

Entwicklungsstrategien für zementgebundene Schäume

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation
von

Dipl.-Ing. Jens Uwe Pott
geboren am 22.03.1976 in Bochum-Wattenscheid

Hannover 2006

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nabil A. Fouad
Tag der Promotion: 15.12.2006

Impressum

Autor: Dipl.-Ing. Jens Uwe Pott
Titel: Entwicklungsstrategien für zementgebundene Schäume
Schriftenreihe: Berichte aus dem Institut für Baustoffe, Heft 5
Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus
Institut für Baustoffe
Leibniz Universität Hannover
Appelstr. 9A und Nienburger Str. 3
30167 Hannover
Tel.: 0511/762-3722
Fax: 0511/762-4736
www.institut-fuer-baustoffe.de
ISBN 978-3-936634-04-4

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der gezielten Herstellung zementgebundener Schäume. Im Mittelpunkt der Überlegungen und Untersuchungen stehen Bedingungen und Grenzen für einen physikalischen Lufteintrag in Zementleime und die Stabilisierung der frischen Zementschäume. Die Luft in Form von Blasen bzw. Poren wird als separate Komponente von aufgeschäumten Zementleimen betrachtet, deren Eigenschaften sich aus der Zusammensetzung und den Eigenschaften des Zementleims in Verbindung mit dem Herstellungsprozess der Schäume ergeben.

Zunächst wurden schaumtechnologische Grundlagen aus unterschiedlichen naturwissenschaftlichen und technischen Bereichen zusammengetragen. Besondere Schwerpunkte lagen dabei auf der Herstellung und der Stabilität von Schäumen sowie den Einflüssen der flüssigen Phase. Weiterhin wurden Einflüsse verschiedener Rezepturparameter und Ausgangsstoffe auf die Eigenschaften von Zementleimen dargestellt. Berücksichtigung fanden dabei vor allem Auswirkungen auf das rheologische Verhalten, die Mischungsstabilität und den Erstarrungsprozess, da diese die Grundlage für die gezielte Optimierung von Zementleimen als flüssige Phase eines Schaums darstellen.

Ausgehend von den Grundlagen der Schaumtechnologie, den betontechnologischen Möglichkeiten zur Steuerung von Zementleimeigenschaften und Vorversuchen wurde eine Modellvorstellung für stabile Zementschäume entwickelt. Diese umfasst die Phasen der Herstellung, der Verarbeitung sowie des Ansteifens, Erstarrens und Erhärtens der Zementschäume. Dabei wurde auf das komplexe Zusammenspiel der verschiedenen Leimkomponenten und deren Einflüssen in den unterschiedlichen Phasen detailliert eingegangen. Aus der Modellvorstellung konnten Strategien für eine Rezepturentwicklung aufschäumbarer Zementleime abgeleitet werden.

Abschließend wurde aus den theoretischen Erwägungen eine stabile Zementschaumrezeptur entwickelt, anhand derer durch Modifikationen die theoretisch hergeleiteten Zusammenhänge und stofflichen Einflüsse experimentell überprüft

und weitgehend bestätigt werden konnten.

Die vorliegende Arbeit hat die Intention, zum Verständnis der Zusammenhänge rund um das Einbringen von Luft in Zementleime beizutragen. Sie soll die breitere technische Nutzung geschäumter, zementgebundener Baustoffe voranbringen. Dabei kann es sich um aufgeschäumte Zementleime handeln; die Ergebnisse können jedoch auch als Grundlage für die Weiterentwicklung von Leichtzuschlagschaumbetonen dienen, die in Verbindung mit sehr leichten Zuschlagstoffen (z.B. Blähglas) definierte Festigkeitseigenschaften bei weiter reduzierten Rohdichten ermöglichen.

Stichwörter

Zementschaum, aufgeschäumter Zementleim, Fließmittel, Stabilisierer, Luftporenbildner, Schaummittel, Leichtbeton, Mischtechnik, Schaumgenerator

Abstract

The thesis at hand deals with the unerring production of cement-bound foams. Considerations and tests are focused mainly on basic conditions and limits of physical air entrainment in cement-pastes. The air is considered as a separate component of the foamed cement-paste, influenced by the mixture and properties of the cement-paste and the foaming-process.

Firstly, technical and scientific basics of foam-technology are delineated, especially basics of foam-production and the influence of the liquid phase. After this, possibilities of influencing the properties of cement-pastes are described. Special attention is paid to the rheological behaviour, mixture stability and the hardening process, as the dominating factors for the optimisation of cement-pastes as liquid phase for cement-bound foams.

From these basics a comprehensive model for stable cement-bound foams was developed. It includes the production, workmanship and hardening. Within this model the complex interaction of different components of cement-pastes and their influences during the three phases are described. Based on this model, important aspects of composition for foamed cement-pastes could be deduced.

Finally, according to the before mentioned aspects, a stable composition for a foamed cement-paste was developed. Modifications of this composition have been tested, in order to prove the consistency of the theoretical model and real behaviour of cement-bound foams.

The intention of this thesis is to deduce main aspects of air entrainment in cement-pastes and concretes. It is supposed to be an essential step in the direction of a more extensive technical use of foamed, cement-bound building materials.

Keywords

foamed cement-paste, superplasticisers, stabilizer, air-entraining admixture, lightweight-concrete, mixing technique, foam generator

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
Abkürzungen und Formelzeichen	ix
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Lösungsweg	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Grundlagen der Schaumtechnologie	7
2.1 Charakterisierung von Schäumen	7
2.1.1 Blasensysteme	8
2.1.2 Kugelschäume	8
2.1.3 Polyederschäume	8
2.1.4 Chemische Schäume	9
2.1.5 Physikalische Schäume	10
2.2 Grenzflächen	10
2.3 Grenzflächenaktive Stoffe	12
2.3.1 Tenside	13
2.3.2 Proteine	16
2.4 Schaumstabilität	19
2.4.1 Zerstörende Einflüsse auf den Schaum	19
2.4.2 Stabilisierende Einflüsse auf den Schaum	23
2.5 Herstellungsverfahren für Schäume	34
2.5.1 Dispergieren eines Gases in einer Flüssigkeit	34
2.5.2 Membranaufschäumen	40
2.5.3 Aerosolverfahren	45
2.6 Rheologie und Fließverhalten von Schäumen	46

3	Einflüsse auf die Eigenschaften von Zementleimen	49
3.1	w/z-Wert, Porenraum und Packungsdichte	49
3.2	Stoffliche Einflüsse	51
3.2.1	Feststoffe allgemein	51
3.2.2	Zement	54
3.2.3	Flugasche	55
3.2.4	Gesteinsmehle	56
3.2.5	Silikastäube	58
3.2.6	Betonverflüssiger und Fließmittel	60
3.2.7	Luftporenbildner und Schaummittel	67
3.2.8	Stabilisierer	71
3.3	Zeitliche Veränderungen	75
3.3.1	Zementhydratation	75
3.3.2	Wasserabgabe an die Umgebung	77
4	Entwicklung von Theorien zu zementgebundenen Schaumstrukturen	81
4.1	Charakterisierung von Zementschäumen	82
4.1.1	Rohdichte, Porosität und Porenstruktur	82
4.1.2	Ausgangsstoffe und Eigenschaftsprofile	89
4.2	Aspekte der Herstellung von zementgebundenen Schäumen und Modellbildung	90
4.2.1	Grundlagen der Betontechnologie und Anforderungen aus der Verarbeitbarkeit	90
4.2.2	Ausbildung von Grenzflächen an den Porenwänden	93
4.2.3	Rheologische Einflüsse auf das Aufschäumen von Zementleimen	98
4.2.4	Stabilität der frischen Zementschäume bis zum Erstarren	108
4.2.5	Erhärten, Austrocknen und Schwinden	133
4.3	Zusammenfassung der Modellvorstellungen und Vorgaben zur Rezepturentwicklung	136
5	Experimentelle Untersuchungen und deren Auswertung	145
5.1	Versuchskonzeption	145
5.2	Aufschäumverfahren	146
5.2.1	Intensivmischer	147
5.2.2	Schaumgenerator	148

5.3	Einflüsse der Leimkomponenten auf das Schäumungsverhalten und die Schaumstabilität	154
5.3.1	Wassergehalt	157
5.3.2	Zemente	159
5.3.3	Füller	163
5.3.4	Schaummittel	166
5.3.5	Fließmittel	171
5.3.6	Stabilisierer	177
5.4	Weitere Untersuchungen und Beobachtungen	182
5.4.1	Festigkeit	182
5.4.2	Untersuchungen der Porenstruktur	188
5.4.3	Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen	196
5.4.4	Verwendung von Trennmitteln	204
5.5	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	205
6	Zusammenfassung und Ausblick	211
6.1	Zusammenfassung	211
6.2	Ausblick	214
	Abbildungsverzeichnis	217
	Tabellenverzeichnis	223
	Literaturverzeichnis	225
	Lebenslauf	237

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

CEM I	Portlandzement
CEM III/B	Hochofenzement mit hohem Hüttensandanteil
CMC	kritische Mizellbildungskonzentration
CSH	Calcium-Silicat-Hydrat
DafStB	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EDX	energiedispersive Röntgenspektroskopie (Energy Dispersive X-ray Analysis)
EN	Europäische Norm
FA	Flugasche
FM	Fließmittel
gaS	grenzflächenaktiver Stoff
KSM	Kalksteinmehl
LP-Gehalt	Luftporengehalt
LP-Beton	Luftporenbeton
OS	organischer Stabilisierer
PCE	Polycarboxylatether
REM	Rasterelektronenmikroskopie
SM	Schaummittel
w/z-Wert	Wasser/Zement-Wert
Z	Zement

Formelzeichen

A	m^2	Fläche
ΔA	m^2	Flächenänderung
A_{tot}	m^2	Porenoberfläche über alle Poren
a	-	thermodynamische Aktivität
c	g/kg	Konzentration
c_T	mol/l	Tensidkonzentration
c_W	-	Widerstandsbeiwert
D	m^2/s	Diffusionskoeffizient
d_F	m	Dicke einer Flüssigkeitsschicht
d_p	m	Durchmesser der Öffnung
d_B	m	Durchmesser der Blase
d_{St}	m	charakteristischer Durchmesser einer Fluidströmung
d_{max}	m	maximaler Blasendurchmesser
E_{tot}	J	Grenzflächenenergie
F	N	Kraft
F_A	N	Auftriebskraft
F_{dA}	N	dynamische Auftriebskraft
F_G	N	Gewichtskraft
F_R	N	Reibungskraft
F_S	N	Strömungskraft eines Fluids
F_W	N	Widerstandskraft eines Fluids
F_σ	N	Grenzflächenkraft
g	M/s^2	Erdbeschleunigung
k_l	-	Konstante, abhängig von Mischer bzw. Scherfeld
L	g/kg	Löslichkeit eines Gases in einer Flüssigkeit
l	m	Länge
p_0	Pa	atm. Druck
p_K	Pa	Laplace-Druck = Kapillardruck
q	-	Konstante
R	$J/(mol \cdot K)$	allgemeine Gaskonstante
R^2	-	Bestimmtheitsmaß
r	m	Radius
r_0	m	Radius zum Zeitpunkt $t=0$
Re	-	Reynold-Zahl
T	K	absolute Temperatur

t	s	Grenzflächenalter
t	s	Zeit
V_B	m^3	Volumen einer Blase
V_G	m^3	Volumenanteil der Gasphase
V_F	m^3	Volumenanteil des Fluids
v	m/s	Geschwindigkeit
v_B	m/s	Relativgeschwindigkeit einer Blase zum Fluid
v_{Fl}	m/s	Relativgeschwindigkeit eines Fluids zur Blase
W	J	Arbeit
ΔW	J	verrichtete Arbeit
We	-	Weber-Zahl
ϵ	-	Gasgehalt
Φ_G	-	Volumenbruch
Γ	mol/m^2	Grenzflächenbeladung
$\dot{\gamma}$	s^{-1}	Schergeschwindigkeit
η	$Pa \cdot s$	(dynamische) Viskosität eines Fluids
η_c	$Pa \cdot s$	Viskosität der kontinuierlichen, hochviskosen Phase
η_d	$Pa \cdot s$	Viskosität der dispersen, niederviskosen Phase
η_{Fl}	$Pa \cdot s$	Viskosität des Fluids
Π	N/m^2	Grenzflächendruck
θ	$^\circ$	Kontraktwinkel
ρ	kg/m^3	Dichte
$\Delta\rho$	kg/m^3	Dichteunterschied
ρ_{Fl}	kg/m^3	Fluiddichte
σ	Pa	Grenzflächenspannung
$\sigma(t)$	Pa	Grenzflächenspannung im Moment der Betrachtung
τ	Pa	Schubspannung
τ_W	Pa	Scherspannung an einer Blasenwand

Weitere Indices

s	solid = Feststoff
l	liquid = Flüssigkeit
g	gas = Gas

1 Einleitung

1.1 Motivation

Zahlreiche Beispiele aus Natur und Technik veranschaulichen eindrucksvoll, dass Waben- oder Zellstrukturen Bauteile von erstaunlicher Stabilität bei vergleichsweise geringem Eigengewicht ermöglichen. Ein natürliches, in der Technik vielfach kopiertes Beispiel sind die von Bienen gebauten Honigwaben. Ihnen nachempfunden sind z.B. die sog. Honeycombs, die im Leichtbau oft als Kernmaterial für Sandwichelemente verwendet werden. Beide sind gekennzeichnet durch eine sehr exakte, regelmäßige Geometrie. Es gibt jedoch auch zahlreiche Beispiele für Zellstrukturen mit unregelmäßigen Geometrien. In der Natur sind dieses z.B. Pflanzenstängel, die Spongiosa als Teil menschlicher und tierischer Knochen sowie Tuff- und Bimssteine. Als entsprechende Beispiele aus dem technischen Bereich lassen sich hier unter anderem Metallschäume und Schaumglas anführen.

Von den natürlichen Beispielen inspiriert, gibt es auch im Betonbau schon seit seinen Anfängen Bestrebungen, leichte und dennoch stabile Betone herzustellen. Stand anfänglich die Verringerung des Eigengewichts einer Konstruktion im Mittelpunkt, wie z.B. beim Bau der Kuppel des Pantheons in Rom [11], kamen insbesondere in den letzten Jahrzehnten weitere Intentionen zur Herstellung leichter und poröser mineralischer Baustoffe hinzu:

- Verbesserte Wärmedämmeigenschaften
- Herstellung leichter, mineralischer Verkleidungen, z.B. zu Brandschutzzwecken
- Erreichen einer plastischen Verformbarkeit des mineralischen Baustoffs, z.B. um Stoßenergien aus An- oder Aufprall aufzunehmen
- Einsparung von Rohstoffen im Austausch gegen Luft

Um all diese Eigenschaften zu erreichen, wird in Anlehnung an leichte und poröse natürliche Gesteine, wie den schon genannten Tuff- und Bimssteinen, auch in künstliche Steine (Beton, Zementstein) ein möglichst hoher Anteil Luft eingebracht. Dazu gibt es im Wesentlichen drei Ansätze, die seit langem bekannt sind:

- Zugabe leichter Gesteinskörnungen oder Zusatzstoffe (Bimsstein, Blähton, Blähglas, expandierte Polystyrolkugeln, etc.) zum Bindemittelleim
- Zugabe von Substanzen, die unter Freisetzung von Gasen in dem Bindemittelleim reagieren und so zu einer Porenbildung von innen beitragen (chemisches Aufschäumen, vgl. Porenbetone)
- Einbringen und Stabilisieren von Luftporen in dem Bindemittelleim während des Herstellungsprozesses (physikalisches Aufschäumen)

Die ersten beiden Verfahren gehören heute zum Stand der Technik [30, 31, 19, 70, 52]. Produkte die nach diesen Verfahren hergestellt werden, kommen z.T. in großem Umfang in der Baupraxis zur Anwendung. Das dritte Vorgehen ist trotz langjähriger Forschung (z.B. [42, 96, 107, 60]) bis heute noch nicht zufriedenstellend umgesetzt. Da weder spezielle Gesteinskörnungen oder Zusatzstoffe noch besondere verfahrenstechnische Schritte, wie z.B. eine Autoklavhärtung, erforderlich sind, stellt es eine gleichermaßen einfache wie ressourcenschonende Lösung für das Problem der Porosierung dar. Dennoch ist es mit den bisherigen Methoden noch nicht gelungen,

- vorgegebene höhere Luftgehalte zuverlässig und zielgerichtet in den Beton einzubringen und
- eine gleichmäßige, homogene Verteilung hoher Luftporengehalte während des Verarbeitungs- und Erhärtungsprozesses sicherzustellen.

Niedrige Luftgehalte (bis ca. 10 Vol.-%) , z.B. zur Erhöhung des Frostwiderstandes, können mit ausreichender Genauigkeit, auch hinsichtlich der Porenstruktur, durch Zugabe von Luftporenbildnern oder Schaumbildnern/Schäumen in den frischen Beton erreicht werden [26, 71]. Für deutlich höhere Luftgehalte, wie sie für die oben genannten Ziele erforderlich sind, gilt dieses jedoch bislang nicht [70]. Es werden zwar bereits seit langem so genannte Schaumbetone

wissenschaftlich untersucht, hergestellt und auch für einfache Anwendungen genutzt [42, 36, 121, 78, 23], die theoretischen Grundlagen für eine Technologie aufgeschäumter Zementleime sind jedoch nach wie vor weitgehend unbekannt.

In der Vergangenheit bestanden aufzuschäumende Zementleime vornehmlich aus einem 3-Stoff-System aus Zement, Wasser und einem Schaumbildner. Dadurch konnte recht einfach durch Variation weniger Parameter wie w/z-Wert, Zementart, Schaumbildnerart und -konzentration sowie Herstellverfahren auf empirischem Wege eine Rezepturoptimierung für Schaumbetone erreicht werden. In der modernen Betontechnologie stehen durch erhebliche Fortschritte in dem Bereich der chemischen Betonzusatzmittel, aber auch durch die vermehrte Verwendung von Betonzusatzstoffen, eine große Anzahl weiterer „Stellschrauben“ zur Verfügung, mit denen die Eigenschaften aufgeschäumter Zementleime beeinflusst und optimiert werden können. Dazu gehören z.B. Einsatz, Art und Dosierung von:

- Füllern (Flugasche, Gesteinsmehle etc.)
- Fließmitteln (Sulphonate, Polycarboxylatether etc.)
- Stabilisierern (organisch oder anorganisch)

Aus der großen Zahl der Parameter und bei Berücksichtigung der zwischen vielen Stoffen bestehenden Wechselwirkungspotentiale wird unmittelbar deutlich, dass eine rein empirische Herangehensweise zur Rezepturoptimierung in solch komplexen Systemen wenn überhaupt nur mit extrem hohem, wirtschaftlich nicht vertretbarem Aufwand zu statistisch abgesicherten und wissenschaftlich verallgemeinerbaren Aussagen führen kann. Stattdessen ist es erforderlich, relevante naturwissenschaftliche und technische Grundlagen für die Schaumherstellung und die Beeinflussung der Schaumeigenschaften zu identifizieren und mit dem betontechnologischen Wissen zu verbinden. Daraus können Modellvorstellungen entwickelt werden, deren Gültigkeit sich gezielt experimentell überprüfen lässt.

1.2 Zielsetzung und Lösungsweg

Ziel dieser Arbeit ist es, die naturwissenschaftlichen Grundlagen zur Herstellung und Stabilität von Schäumen mit dem betontechnologischen Wissen über

Zementleime zu verknüpfen, um daraus Entwicklungsstrategien zur systematischen Herstellung von zementgebundenen Schäumen abzuleiten. Diese erarbeiteten Entwicklungsstrategien werden experimentell verifiziert. Damit wird die Basis für die Weiterentwicklung von leichten, zementgebundenen Baustoffen, wie z.B. Konstruktionsleichtbetonen, Schaumbetonen, mineralischen Wärmedämmungen, Brand- und Anprallschutzsystemen etc., gelegt.

Zunächst ist es erforderlich, die Luft als eigenständige Komponente im Zementleim zu betrachten. Anders als bei Feststoffen, deren Eigenschaften (Korngröße, Oberflächenbeschaffenheit etc.) unabhängig vom Leim dargestellt werden können, weist die Luft in Form von Luftblasen bzw. Poren nur innerhalb des Leims ihre charakteristische Struktur auf. Diese Struktur zeigt darüber hinaus Wechselwirkungen mit den Eigenschaften des umgebenden Leims und ist, wie der Leim selbst, zeitlichen Veränderungen unterworfen. Auf Grund der Komplexität des Systems aufgeschäumter Zementleim ist eine dreistufige Betrachtung erforderlich. Zunächst wird die Luft modellhaft als disperse Phase in einem homogenen, kontinuierlichen Fluid betrachtet (idealer Schaum). Daraus sollen Anforderungen an den Zementleim als kontinuierliches Fluid abgeleitet werden. Anschließend werden ausgehend vom inhomogenen Aufbau der Zementleime betontechnologische Ansätze zur Erfüllung dieser Anforderungen diskutiert. Diese Überlegungen münden in einer Modellvorstellung für Zementschäume, die die Basis für Strategien zur Rezepturenentwicklung ist. Abschließend soll an ausgewählten Parametern die Übertragbarkeit und Anwendbarkeit der entwickelten Ansätze für die Herstellung von Zementschäumen überprüft werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Ausgehend von einer umfangreichen Literaturlauswertung werden wesentliche naturwissenschaftliche und technische Grundlagen für die Herstellung und die Eigenschaften von Schäumen zusammengefasst. Dieses erfolgt bereits im Hinblick auf eine Anwendung für aufgeschäumte Zementleime. Im Fokus der Betrachtung stehen daher insbesondere der Einfluss der kontinuierlichen Phase sowie die zur Schwächung oder Stabilisierung von Schäumen führenden Mechanismen.

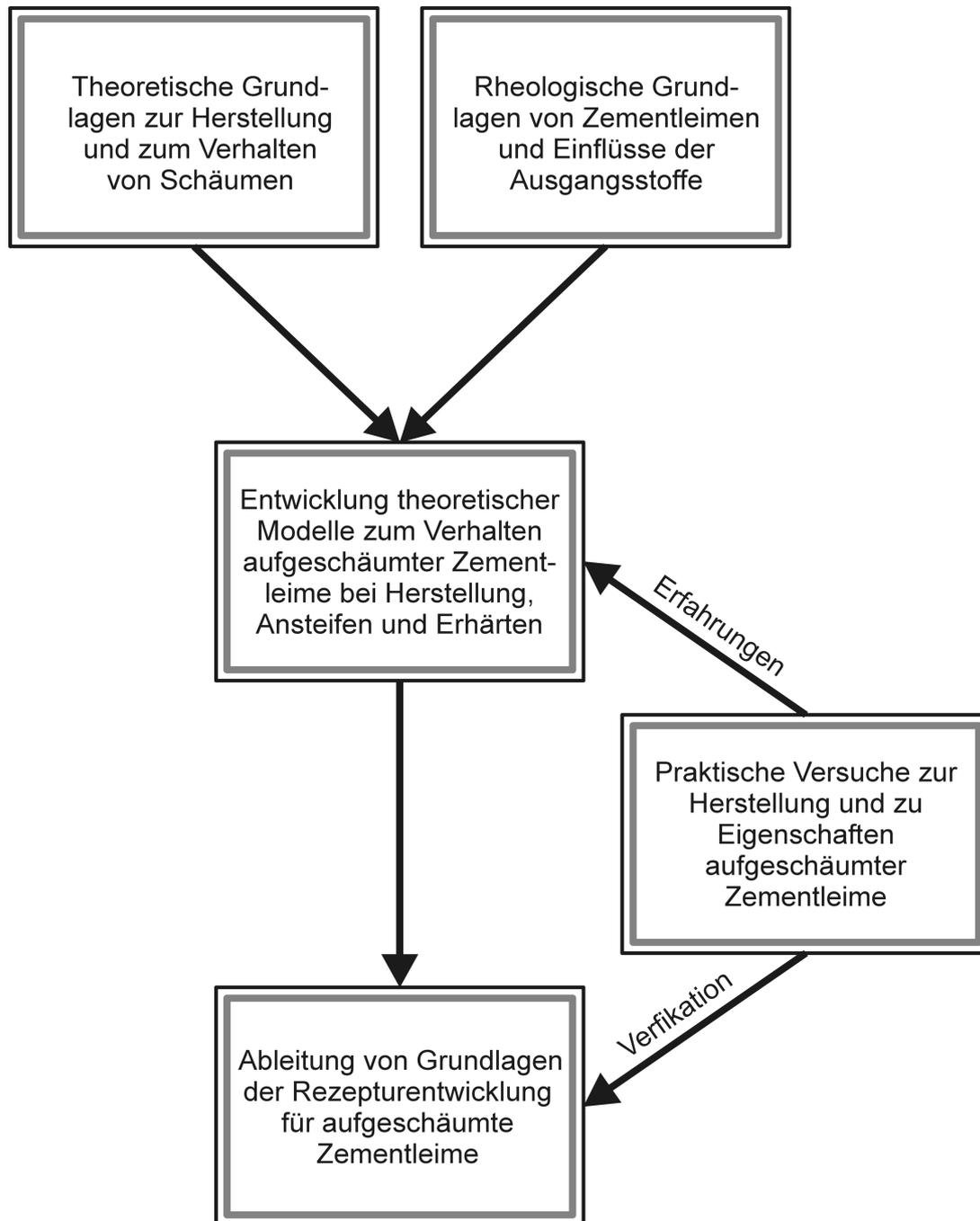


Abbildung 1.1: Übersicht über den Aufbau der Arbeit

Im Anschluss daran folgt ein ebenfalls literaturbasierter, breiter Querschnitt über die unterschiedlichen Einflüsse verschiedener Ausgangsstoffe auf die Eigenschaften von Zementleimen. Dabei geht es nicht allein um die Auswirkungen auf den Zementleim, sondern vor allem auch um die Darstellung der naturwissenschaftlichen Ursachen, also der Wirkmechanismen. Dadurch werden mögliche Wege aufgezeigt, Leimeigenschaften sehr gezielt zu beeinflussen. Es werden bewusst auch unterschiedliche Wege, die zu vergleichbaren Ergebnissen führen, erläutert. So können verschiedene Wirkmechanismen, die ähnliche Auswirkungen auf den Leim haben, aber unterschiedliche Effekte in zementgebundenen Schäumen hervorrufen, später einander gegenübergestellt werden.

Die Kenntnisse aus der Schaumtheorie und der Technologie der Zementleime werden zusammengeführt und miteinander verknüpft. Damit werden erstmals die theoretischen Grundlagen für das in der Betontechnologie bislang im Wesentlichen nach der „trial and error“-Methode verfolgte physikalische Aufschäumen von Zementleimen geliefert. Nach Stoffen bzw. Stoffgruppen getrennt werden im Wechselspiel von theoretischen Erwägungen und experimentellen Erfahrungen Einflüsse auf die Herstellung und die Eigenschaften von zementgebundenen Schäumen erarbeitet. Dabei werden drei Phasen berücksichtigt, die Leimherstellung mit dem Aufschäumprozess, das Ansteifen bis zum Erstarren und die Erhärtung des Zementleims.

Mit den daraus ableitbaren Ursache-Wirkung-Relationen ist es möglich, Zementschäume erheblich zielgerichteter herzustellen, als das in der Vergangenheit der Fall war. Ausgangsstoffe und rheologische Eigenschaften der Leime können so ausgewählt werden, dass bestimmte Schaumstrukturen zuverlässiger erreicht werden können. Durch systematische Versuche erfolgt eine praktische Überprüfung der überwiegend theoretisch hergeleiteten Zusammenhänge und Modellvorstellungen.

2 Grundlagen der Schaumtechnologie

2.1 Charakterisierung von Schäumen

Schaum ist definiert als eine Dispersion von Gas (disperse Phase) in einer Flüssigkeit (kontinuierliche Phase) [12]. Der Gaseintrag kann durch Einblasen, Rühren, Schütteln, Schütten, Gasentlösen oder eine chemische Reaktion erfolgen. Die Gasphase verteilt sich auf eine große Zahl einzelner Blasen, die durch dünne Filme, die Schaumlamellen, voneinander getrennt sind. In einem wässrigen Schaum können die Gasblasen Größen von wenigen Mikrometern bis hin zu mehreren Zentimetern erreichen. Typische Filmdicken können sich vom Mikrometerbereich bis zu wenigen Nanometern erstrecken. Die Schaumstruktur ist abhängig vom Volumenanteil des Gases, der als Volumenbruch Φ_G oder Gasgehalt ϵ bezeichnet wird:

$$\Phi_G = \frac{V_G}{V_G + V_{Fl}} \quad (2.1)$$

mit:

- Φ_G = Volumenbruch
- V_G = Volumenanteil der Gasphase
- V_{Fl} = Volumenanteil des Fluids

Grundsätzlich wird von Schaum erst ab einem Volumenbruch Φ_G größer 0,52 gesprochen (vgl. Abbildung 2.1). Bei einem Volumenbruch Φ_G kleiner 0,52 spricht man von einem Blasensystem [104]. Schäume können grob in zwei Arten eingeteilt werden: Nasse Schäume mit einem Volumenbruch Φ_G kleiner als 0,74 besitzen dicke Lamellen und Gasblasen mit kugelförmiger Gestalt, so dass auch von Kugelschäumen gesprochen wird. Trockene Schäume weisen einen höheren Volumenbruch Φ_G auf, der sich zwischen 0,74 und 1 bewegt. In diesem Fall verformen sich die Gasblasen im Schaum zu Polyedern, worauf die Bezeichnung Polyederschaum für einen derartigen Schaum zurückzuführen ist [74, 47].

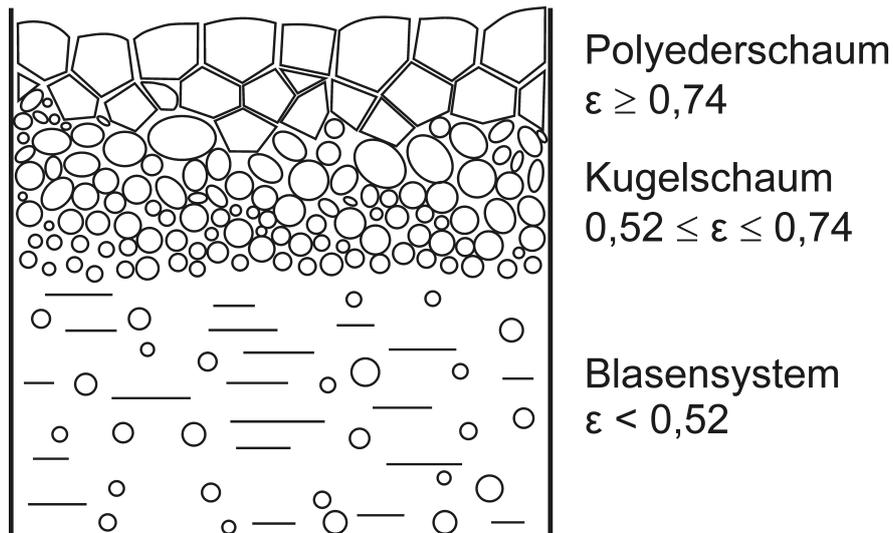


Abbildung 2.1: Charakterisierung einer Flüssigkeit/Gas-Dispersion anhand des Gasgehaltes ϵ , nach [64]

2.1.1 Blasensysteme

Blasensysteme sind durch einen relativ geringen Luftgehalt von maximal 52 Vol.-% gekennzeichnet. Daher sind sie in ihren Eigenschaften primär von der kontinuierlichen Phase geprägt. Die einzelnen Blasen sind weitgehend voneinander unabhängig. Eine direkte wechselseitige Beeinflussung erfolgt nur bei zufälliger Annäherung der Blasen aneinander.

2.1.2 Kugelschäume

In Kugelschäumen stellt die disperse Phase, d.h. die Gasphase, bereits den deutlich überwiegenden Volumenanteil dar (52-74 Vol.-%). Dennoch ist der Anteil der kontinuierlichen Phase noch so groß, dass die Gasblasen in dieser weitgehend unabhängig voneinander vorliegen. Ohne äußere Einwirkungen würde sich bei den Blasen eine ideale Kugelform einstellen.

2.1.3 Polyederschäume

Polyederschäume weisen einen hohen Volumenanteil der Gasphase von mindestens 74 Vol.-% auf. Die Dicke der kontinuierlichen Phase zwischen den Luftblasen (die Lamellen) ist so dünn, dass die Blasen sich gegenseitig in ihrer Formgebung beeinflussen. Das führt zu wabenförmigen Strukturen. Nach den

von Plateau beschriebenen Gesetzmäßigkeiten treffen jeweils drei Lamellen in einem Winkel von 120° aufeinander und bilden die sog. Plateaugrenze (vgl. Abbildung 2.2). An den Knotenpunkten schneiden sich wiederum vier Plateaugrenzen unter einem Winkel von ca. $109,5^\circ$. Die Blasen sind fragil und neigen zu Zusammenschlüssen [64].

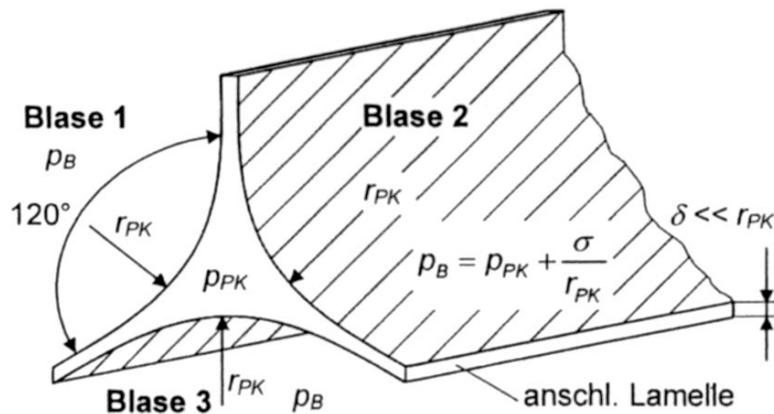


Abbildung 2.2: Darstellung einer Plateaugrenze, aus [64]

2.1.4 Chemische Schäume

Chemische Schäume entstehen durch die Freisetzung von Gasen in Folge chemischer Reaktionen in einer flüssigen Stoffmischung. Dabei ist zur stabilen Herstellung eines Schaums auf das richtige Verhältnis zwischen Viskosität und Rohdichte der Stoffmischung sowie der Blasenbildung (Gasmenge und -verteilung) zu achten. Die Blasengröße hängt wesentlich von den rheologischen Eigenschaften und der Grenzflächenspannung der flüssigen Stoffmischung ab. Der Volumenbruch kann durch die Dosierung der Reaktionspartner beeinflusst werden. In der Regel folgt der expandierenden Reaktion der chemischen Schäume eine erhärtende Reaktion, durch die die Schaumstruktur dauerhaft erhalten bleibt. Als Beispiel aus dem Baustoffbereich dient hier der Porenbeton, dem bei der Herstellung ein Aluminiumpulver zugegeben wird, das durch chemische Reaktion in dem alkalischen Milieu der anderen Zugabestoffe Wasserstoff freisetzt. Das Aluminiumpulver fungiert also als Treibmittel. Die Treibmittel, die in Abhängigkeit von den sonstigen Grundstoffen gewählt werden müssen, sind charakteristisch für chemische Schäume.

2.1.5 Physikalische Schäume

Im Gegensatz zu den chemischen Schäumen erfordern die physikalischen Schäume keine Treibmittel. Sie entstehen durch den Einschluss von Gas in einer Flüssigkeit. Dies erfolgt in der Regel durch mechanische Einwirkung oder durch Schaumgeneratoren, die auf verschiedenen physikalischen Prozessen basieren können. Die dabei entstehenden Grenzflächen zwischen Flüssigkeit und Gas werden durch grenzflächenaktive Stoffe stabilisiert. Die Funktionsprinzipien werden noch in einem späteren Kapitel erläutert. Bei physikalischen Schäumen setzt unmittelbar nach ihrer Herstellung ein sukzessiver Zerfall ein. Sie sind nicht stabil, es sei denn, die flüssige Phase wird durch Abkühlen oder chemische Reaktion kurz nach Herstellung des Schaums zum Erstarren gebracht. In diesem Fall dienen die Gasblasen wie bei den chemischen Schäumen lediglich vorübergehend als Stützkörper, bis sich eine tragfähige Feststoffstruktur ausgebildet hat.

2.2 Grenzflächen

Treffen zwei unterschiedliche, nicht ineinander lösliche Stoffe im Raum aufeinander, so bildet sich zwischen ihnen eine deutliche Grenze aus, die so genannte Grenzfläche. Grenzflächen zwischen Flüssigkeit und Gas oder Feststoff und Gas werden oft auch als Oberflächen bezeichnet. Maßgebend für die Ausbildung der jeweiligen Grenzfläche sind die Eigenschaften der in ihrem direkten Einzugsbereich angrenzenden Stoffe, die sog. Phasen. In der Grenzflächenphysik beschreibt die Phase ein begrenztes Gebiet mit konstanten, charakteristischen Parametern (Zusammensetzung, Druck, Temperatur etc.).

Grenzflächen zeigen besondere Eigenschaften, von denen die Grenzflächenspannung die wohl wesentlichste ist. Ursache für die Grenzflächenspannung sind Wechselwirkungen zwischen den Molekülen der einzelnen Stoffe (Molekularkräfte), die sich in der Regel gegenseitig anziehen. Im Inneren eines Stoffes bestehen diese Wechselwirkungen zwischen allen benachbarten, gleichartigen Molekülen in gleicher Weise. Im Mittel heben sich daher alle Kräfte gegenseitig auf und jedes Molekül befindet sich im Gleichgewicht. Betrachtet man ein Molekül an der Grenzfläche, so fehlt ein Teil der Wechselwirkungen mit den gleichartigen Molekülen. Zwar treten auch Wechselwirkungen mit den Molekülen des angrenzenden Stoffes auf, doch sind die dabei wirkenden Kräfte unter der Voraussetzung der Nichtlöslichkeit schwächer. Auf ein Molekül an der Grenzfläche wirkt also

eine resultierende, nach innen in den Stoff hinein gerichtete Kraft, die senkrecht zur Grenzfläche gerichtet ist (vgl. Abbildung 2.3).

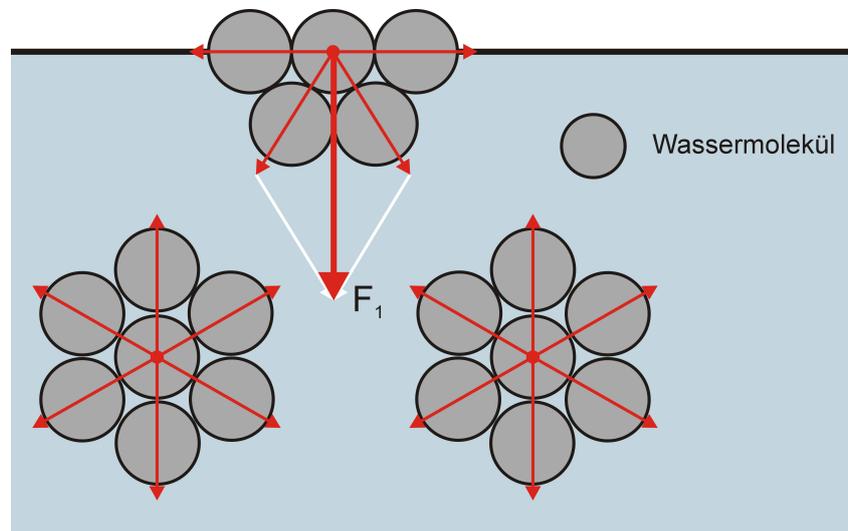


Abbildung 2.3: Modell einer Grenzfläche, nach [45, 32]

Um ein Molekül aus dem Inneren eines Stoffes an die Grenzfläche zu bringen, z.B. zur Vergrößerung der Grenzfläche, muss die Resultierende der Molekularkräfte überwunden werden. Das heißt, es bedarf eines zusätzlichen Energieeintrags von außen. Der umgekehrte Vorgang führt entsprechend zu einer Energiefreisetzung. Diese Energie entspricht der Grenzflächenenergie, die stets einen Minimalwert anstrebt.

Da eine Vergrößerung der Grenzfläche somit eine Zunahme der Grenzflächenenergie bedeutet, tritt dadurch eine zweidimensionale Spannung auf, die der Vergrößerung der Grenzfläche entgegenwirkt. Diese Spannung wird als Oberflächen- oder Grenzflächenspannung σ bezeichnet und ergibt sich aus dem Verhältnis der zur Vergrößerung der Grenzfläche erforderlichen Arbeit ΔW zur Grenzflächenänderung ΔA .

$$\sigma = \frac{\Delta W}{\Delta A} \quad (2.2)$$

Bei steigenden Temperaturen verringert sich die Grenz- bzw. Oberflächenspannung σ meist geringfügig [10].

2.3 Grenzflächenaktive Stoffe

Das Streben zweier Stoffe nach minimaler Grenzflächenenergie führt bei flüssigen und gasförmigen Stoffen unter Schwerkraftbedingungen in der Regel zu einer horizontalen Schichtung entsprechend der Stoffdichte. Dieser Zustand stellt sich auch nach einer Vermischung (Emulsion oder Dispersion) sukzessive wieder ein. Die Geschwindigkeit bis zum Erreichen dieser Trennung hängt von den Grenzflächenspannungen der Stoffe ab. Eine Beeinflussung dieses Vorgangs ist durch eine Veränderung der Grenzflächenspannungen möglich. Diese kann durch die Adsorption von so genannten grenzflächenaktiven Stoffen erreicht werden. Dabei kann ein grenzflächenaktiver Stoff nur adsorbiert werden, wenn er die Grenzflächenspannung σ erniedrigt d.h. die Grenzflächenenergie verringert. Bis die Phasengrenzfläche vollständig mit einer monomolekularen Schicht des grenzflächenaktiven Stoffes besetzt ist, nimmt die Grenzflächenspannung mit zunehmender Beladung ab. Dieses wird ausgedrückt durch die *Gibbs'sche* Gleichung:

$$\Delta\sigma = -R \cdot T \cdot \Gamma \cdot \Delta \ln a \quad (2.3)$$

mit:

- σ = Grenzflächenspannung
- R = allgemeine Gaskonstante
- T = absolute Temperatur
- Γ = Grenzflächenbeladung
- a = thermodynamische Aktivität

Statt der meist unbekannteren thermodynamischen Aktivität a kann für niedrige Konzentrationen des grenzflächenaktiven Stoffes auch dessen molare Konzentration eingesetzt werden [10].

Sind unterschiedliche grenzflächenaktive Stoffe vorhanden, werden die Grenzflächen zunächst mit solchen belegt, die relativ beweglich und klein sind. Langfristig werden die Grenzflächen jedoch mit den grenzflächenaktiven Stoffen belegt, die die Grenzflächenspannung am meisten herabsetzen. Dabei können zuvor adsorbierte, kleine Moleküle wieder verdrängt und ersetzt werden. Dieser Vorgang setzt sich fort, bis die minimale Grenzflächenspannung erreicht ist. Die Gültigkeit von Gleichung 2.3 ist jedoch auf grenzflächenaktive Stoffe in geringer

Konzentration begrenzt. Ferner müssen diese an den Grenzflächen dynamisch adsorbieren und desorbieren können. Vor allem bei makromolekularen grenzflächenaktiven Stoffen ist die Adsorption an der Phasengrenzfläche häufig irreversibel. In diesen Fällen kann sich ggf. dauerhaft kein Adsorptionsgleichgewicht einstellen.

2.3.1 Tenside

Tenside sind eine umfangreiche Gruppe der grenzflächenaktiven Stoffe. Sie verfügen über einen charakteristischen Aufbau mit mindestens je einer hydrophoben sowie einer polaren, hydrophilen funktionalen Gruppe pro Molekül.

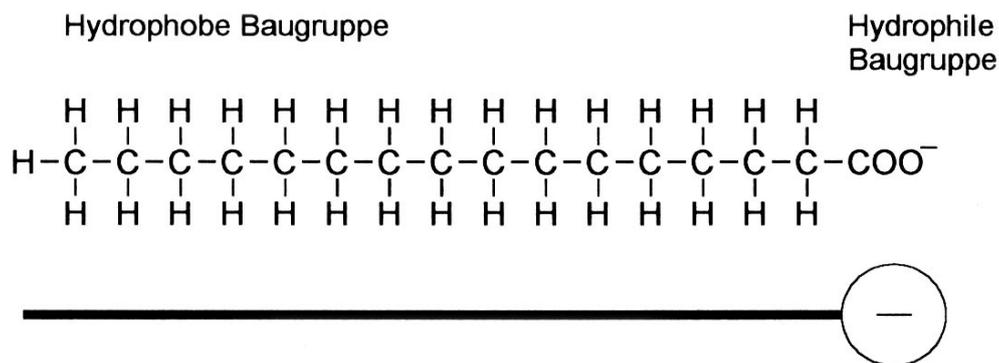


Abbildung 2.4: Schematischer Aufbau eines einfachen Tensids (Seife), nach [8]

Gibt man Moleküle mit hydrophoben und hydrophilen Anteilen in Wasser, so werden sie sich bei Überwiegen der hydrophilen Eigenschaften lösen, bei Überwiegen der hydrophoben Eigenschaften werden sie aufrahmen. Nur wenn beide Eigenschaften des Moleküls im Gleichgewicht zueinander stehen, reichert sich die Substanz an Grenzflächen an und richtet sich dabei mit dem hydrophilen Anteil zum Wasser und mit dem hydrophoben Anteil zu der anderen Phase (fest, flüssig oder gasförmig) aus. Durch die Polarität des hydrophilen Anteils der Tenside werden die intermolekularen Anziehungskräfte der Wassermoleküle geschwächt, was zu einer Reduzierung der Grenzflächenspannung führt (vgl. Abbildung 2.5) [8]. Eine weitere besondere Eigenschaft von Tensiden ist die Fähigkeit zur Bildung von Micellen, bei denen sich mehrere Tensidmoleküle so zueinander anordnen, dass die polaren Gruppen eine Schale bilden [92] (vgl. Abbildung 2.6). Ihre Stabilisierung erfolgt durch *van der Waals'sche* Kräfte. Die Eigenschaften eines Tensids werden im Allgemeinen durch den hydrophilen Molekülteil bestimmt. Man unterscheidet je nach Ladung dieses Teils anionische,

kationische, amphotere und nichtionische Tenside [56]. Der hydrophobe Teil ist in der Regel ein linearer, verzweigter oder cyclischer Kohlenwasserstoffrest [35, 77]. Bei der Herstellung einer Dispersion oder Emulsion wird die disperse Phase meist schnell zerkleinert und damit einhergehend die Phasengrenzfläche innerhalb kurzer Zeit stark vergrößert. Somit ist ein wichtiger Faktor für die Stabilität der Dispersion/Emulsion die Geschwindigkeit, mit welcher die grenzflächenaktiven Moleküle die Phasengrenzfläche besetzen. Um einen Zusammenschluss (Koaleszenz) der Tropfen oder Blasen zu vermeiden, ist eine möglichst schnelle Besetzung erforderlich. Die Geschwindigkeit mit welcher ein Tensid die Phasengrenzfläche besetzen kann, ist wesentlich von seinem Molekulargewicht abhängig. Je kleiner das Molekulargewicht, desto höher ist seine Diffusionsgeschwindigkeit an die Grenzfläche. Die Adsorptionsgeschwindigkeit an der Grenzfläche wiederum wird vom molekularen Aufbau des Tensids bestimmt. Der Adsorptionsvorgang von Tensiden ist im Allgemeinen reversibel, wodurch sich auf Dauer ein dynamischer Prozess von Adsorption und Desorption der Tensidmoleküle an der Grenzfläche einstellt. Dieser befindet sich im Gleichgewicht, wenn die maximale Grenzflächenbeladung Γ_{max} erreicht ist. Je höher die Grenzflächenbeladung Γ , definiert als Tensidmenge (in Mol) je Grenzfläche, desto stabiler sind die Tropfen bzw. Blasen gegen Koaleszenz.

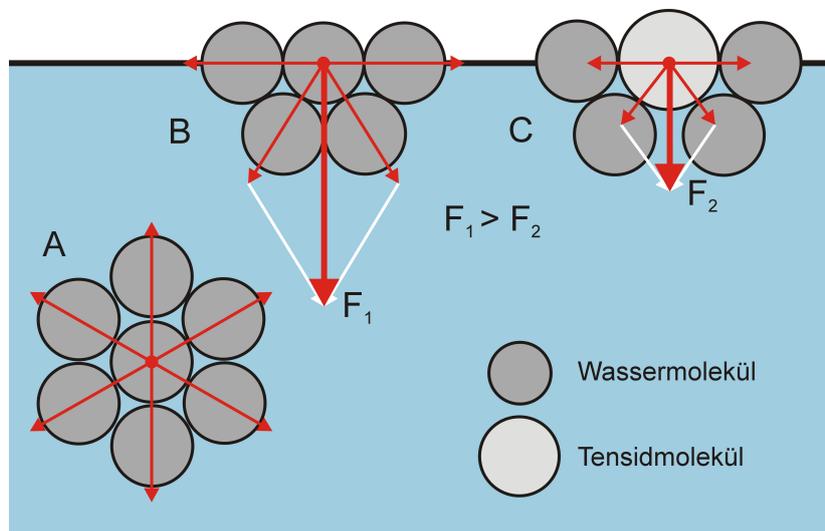


Abbildung 2.5: Wirkungsweise der Tenside bei der Reduzierung der Grenzflächenspannung, nach [32]

Einfluss auf die Kinetik der Grenzflächenbesetzung und die Grenzflächenbeladung haben neben dem Molekülaufbau des Tensids die Verteilung und Konzentration der Tensidmoleküle in der Flüssigkeit sowie die Milieubedingungen. Die Charakteristik „Adsorptionsgeschwindigkeit“ eines Tensids bezieht sich auf

den gesamten Prozess der Grenzflächenbesetzung, das heißt den Transport der grenzflächenaktiven Moleküle an die Phasengrenzfläche und die Adsorption an der Grenzfläche selbst [4]. Die Adsorption an der Grenzfläche verläuft je nach Struktur und Verteilung des Tensids diffusions- oder barrierenkontrolliert. Diffundieren die Moleküle langsamer als sie sich anlagern können, so ist die Adsorption diffusionskontrolliert. Wenn die Moleküle schneller diffundieren als sie sich anlagern können und die Anlagerung somit begrenzend ist, ist die Adsorption barrierenkontrolliert. Für die Grenzflächenbeladung Γ gilt auf Grundlage des 2. *Fick'schen* Gesetzes für den instationären Stoffübergang zu Beginn der Grenzflächenbelegung annähernd:

$$\Gamma = \frac{2}{\Pi} \cdot c \cdot \left(\frac{D}{t}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

mit:

- Γ = Grenzflächenbeladung
- t = Grenzflächenalter
- Π = Grenzflächendruck
- c = Konzentration
- D = Diffusionskoeffizient

Darüber hinaus gilt mit den zuvor beschriebenen Einschränkungen Gleichung 2.3.

Hiernach nimmt bei steigender Tensidkonzentration die Grenzflächenspannung ab. Experimentell hat sich gezeigt, dass eine Abnahme der Grenzflächenspannung erst erfolgt, wenn eine komplette Monolayerschicht an der Grenzfläche vorliegt. Eine weitere Anlagerung von Tensiden erfolgt bei weiter steigender Tensidkonzentration bis die maximal mögliche Belegung, man spricht hier von der kritischen Mizellbildungskonzentration (CMC) [56], erreicht ist. Eine weitere Erhöhung der Konzentration führt zur vermehrten Bildung von Tensidmizellen in der Flüssigkeit.

Bei sehr hohen Tensidkonzentrationen kann es zu einem Zusammenschluss großer Anzahlen von Tensidmolekülen kommen, die zu räumlichen Strukturen mit erheblichem Ausmaß anwachsen können (vgl. Abbildung 2.6). Diese können die physikalischen Eigenschaften der Lösung dahingehend verändern, dass sich Übergangszustände mit Eigenschaften sowohl von Flüssigkeiten als auch von Feststoffen ergeben (gelartige Stoffe) [56].

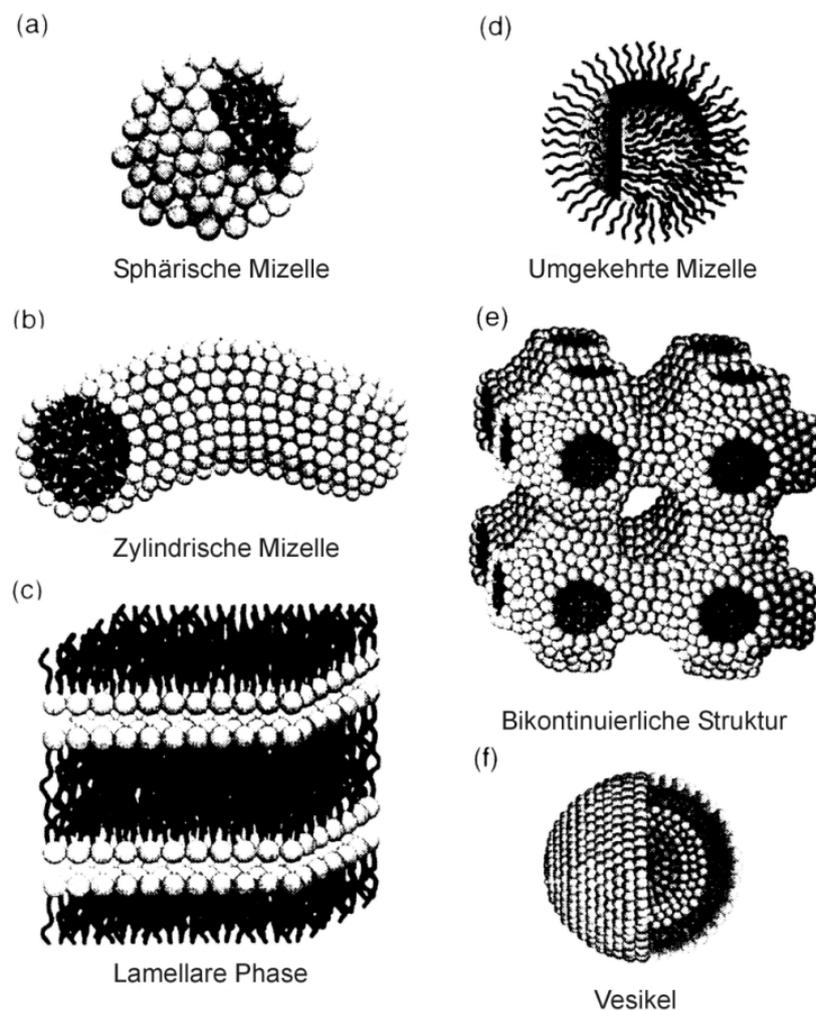


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung unterschiedlicher räumlicher Mizellstrukturen, nach [56]

2.3.2 Proteine

Neben den Tensiden sind auch Proteine in der Lage, an Grenzflächen zu adsorbieren und die Grenzflächenspannung herabzusetzen. Proteine haben einen Zwitterionencharakter und zählen daher zu den amphoteren grenzflächenaktiven Stoffen. Sie sind Makromoleküle, die über verschiedene Molekülteile verfügen, welche sowohl positiv als auch negativ geladene Gruppen und hydrophile und hydrophobe Bereiche aufweisen. Auf Grund dieser Eigenschaft können Proteinmoleküle gleichzeitig mehrere Berührungsbereiche zwischen Molekül und Grenzfläche bilden. Der Vorgang der Grenzflächenstabilisierung durch Proteinmoleküle teilt sich, wie bei den Tensiden, in einen Diffusions- und einen Adsorptionsvorgang (Abbildung 2.7). Bedingt durch die größeren Moleküle ist

jedoch die Diffusionsgeschwindigkeit deutlich langsamer als bei den kleineren Tensiden. Weiteren Einfluss auf die Diffusionsgeschwindigkeit hat der Auffaltungsgrad des Proteinmoleküls, das heißt der Fortschritt der Veränderung von einer kompakten Knäuelstruktur zu einer linearen, aufgefalteten, vordenaturierten Struktur. Die Diffusionsgeschwindigkeit nimmt auf Grund der „sperrigeren“ Form der Moleküle mit zunehmendem Auffaltungsgrad ab. Weiterhin wird die Diffusionsgeschwindigkeit von Temperatur, pH-Wert und Ionenstärke beeinflusst [4]. Der Ablauf der Adsorption und die Adsorptionsgeschwindigkeit an der Grenzfläche sind abhängig von der Struktur des Proteins, der Grenzflächenhydrophobizität, dem Molekulargewicht und der Konformationsstabilität. Eine Ableitung des Grenzflächenverhaltens der Proteine von den jeweiligen einzelnen molekularen Charakteristika ist jedoch nicht möglich. Alle Eigenschaften müssen in ihrem Zusammenwirken berücksichtigt werden [27].

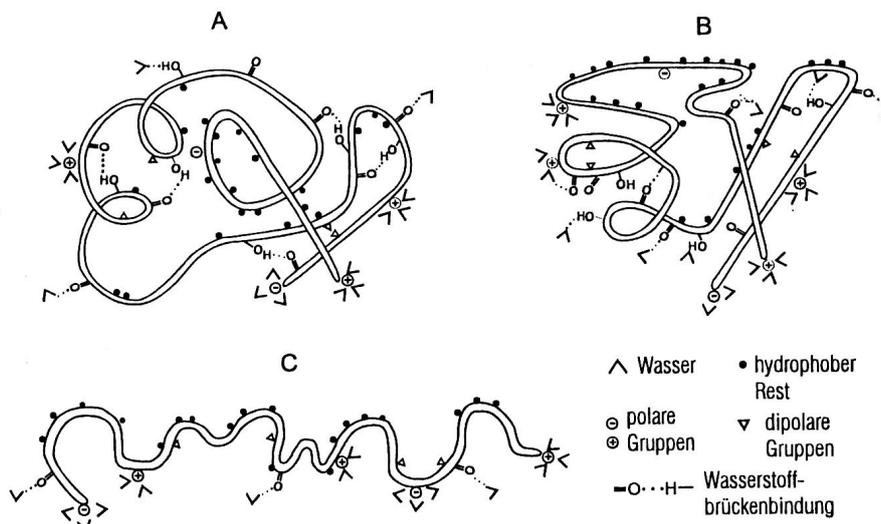


Abbildung 2.7: Anordnung eines globulären Proteinmoleküls an einer Grenzfläche. A: natives globuläres Proteinmolekül in wässriger Lösung; B: in der Nähe der Grenzfläche; C: an der Grenzfläche adsorbiert, entfaltet und hydratisiert, nach [10]

Im Vergleich zu den niedermolekularen Tensiden ist die Grenzflächenbelegung bei den makromolekularen Proteinen bereits bei sehr geringen Konzentrationen sehr hoch, erfolgt jedoch deutlich langsamer. Dies bedeutet, dass bei Proteinen der Transportvorgang der Moleküle an die Grenzfläche und die Adsorptionsgeschwindigkeit für deren stabilisierende Wirkung begrenzend ist.

Die großen, gefalteten Proteinmoleküle verhalten sich an der Grenzfläche anders als die kleineren Tensidmoleküle. Sie können unterschiedliche Strukturen und Gestalten annehmen und sind somit hinsichtlich äußerer Einflüsse sehr anpassungsfähig (vgl. Abbildungen 2.7 und 2.8, links). Diese Eigenschaft wird Kon-

formitätspotential genannt. Durch die Adsorption und Konformitätsänderung des Proteinmoleküls an der Grenzfläche wird die freie Grenzflächenenergie minimiert. Durch das Auffalten des Moleküls werden hydrophobe Gruppen in seinem Inneren freigelegt, die reagieren und zu neuen Molekülzuständen führen. Dieser Vorgang ist oftmals irreversibel und kann daher nicht durch die *Gibbs'sche* Gleichung (Gleichung 2.3) erfasst werden. Proteinmoleküle sind in der Lage, sich an unterschiedliche Anforderungen anzupassen. Ändern sich die Milieubedingungen, z. B. beim Erreichen einer Phasengrenze, falten sie sich auf und bilden flexible, zusammenhaltende Filme. Der Grad der Auffaltung (=Grenzflächen-denaturierung, Strukturveränderungen an und entlang der Grenzfläche) ergibt sich dabei aus der Konformationsstabilität des Moleküls und den Grenzflächenkräften. Proteine erreichen eine höhere Gleichgewichtsgrenzflächenspannung als Tenside. Im Gegensatz zu den Tensiden, welche die Grenzfläche nahezu vollständig belegen, steht bei den Proteinen auf Grund ihrer räumlichen Struktur nur etwa ein Drittel des verbundenen Moleküls in direktem Kontakt mit der Grenzfläche. Obwohl die molare Grenzflächenbeladung im Vergleich zu den Tensiden niedriger ist, bilden Proteine daher einen dicken, mehrschichtigen Grenzflächenfilm [4]. Dieser Film ist auf Grund der ausgeprägten inter- und intramolekularen Vernetzungen für die hohe Stabilität von Schäumen mit Proteinen als grenzflächenaktiven Substanzen verantwortlich.

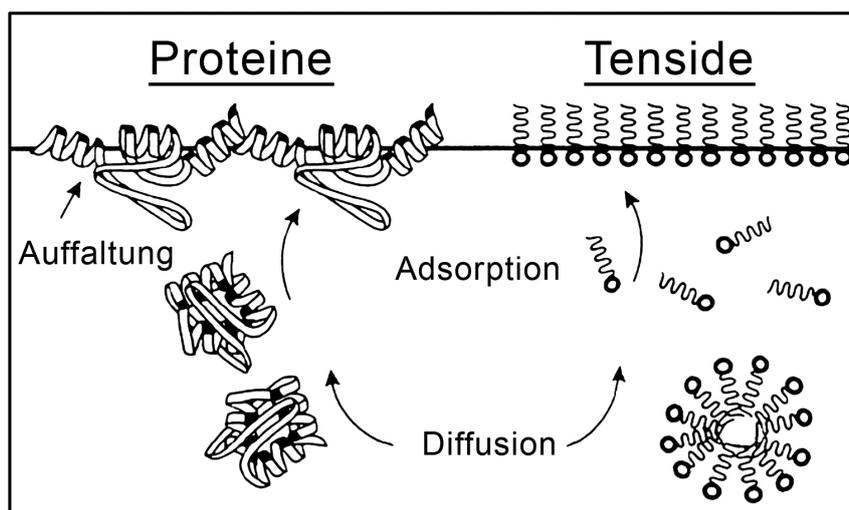


Abbildung 2.8: Adsorptionsmechanismen von Proteinen und Tensiden. Proteine beinhalten hydrophobe Bereiche, die sich in einem Auffaltungsprozess entlang der Grenzfläche anordnen. Tenside sind kleiner und adsorbieren gleichgerichtet an der Grenzfläche. [116]

Tabelle 2.1: Grenzflächeneigenschaften von Proteinen und Tensiden, nach [79]

Parameter	Protein	Tensid
Grenzflächenspannung [mN/m]	ca. 50	ca. 20-30
Grenzflächenbelegung [mol/m^2]	niedrig	hoch
Filmdicke im Gleichgewicht [nm]	40	4
Adsorption	irreversibel	reversibel
Konformationsänderung	ja	nein
Filmbildung	ja	nein
Blasengrößenverteilung	kleine Blasen	größere Blasen
Drainage	langsam	schnell
Ostwald-Reifung	langsam	schnell

2.4 Schaumstabilität

Ein Schaum als Zweiphasensystem ist ein metastabiles Gebilde. Die Bildung von stabilen Schäumen basiert auf der stabilisierenden Wirkung grenzflächenaktiver Moleküle, die sich wie im Kapitel 2.2 beschrieben, an den Grenzflächen Flüssigkeit/Gas anreichern. Durch ihren speziellen molekularen Aufbau sind sie in der Lage, Grenzflächenspannungen zu reduzieren. Da die Grenzflächenenergie eines Schaums nach Gleichung 2.5 direkt von der Grenzflächenspannung abhängt, wird auch diese durch grenzflächenaktive Moleküle verringert.

$$E_{tot} = A_{tot} \cdot \sigma_{lg} \quad (2.5)$$

mit:

E_{tot} = Grenzflächenenergie

A_{tot} = Porenoberfläche über alle Poren

σ_{lg} = Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Gasphase

Wird ein flüssiger Schaum auf Dauer sich selbst überlassen, strebt er eine minimale Grenzflächenenergie an. Diese ist unter Schwerkraftbedingungen erreicht, wenn Gas und Flüssigkeit vollständig voneinander getrennt sind.

2.4.1 Zerstörende Einflüsse auf den Schaum

Blasenbewegungen und Entlüften

Vor allem bei Schäumen mit geringen Gasgehalten (Blasensysteme und Kugelschäume) kann es zu einem Aufsteigen von Blasen kommen, die die Homoge-

nität des Schaums verringern und zu unterschiedlichen Gasgehalten über den Querschnitt führen. Dadurch kann nach einer gewissen Standzeit aus einem homogenen Kugelschaum im unteren Bereich ein Blasensystem und im oberen Bereich ein Polyederschaum entstehen, entsprechend der Skizze der Blasensäule in Abbildung 2.1. Diese Aufwärtsbewegung der Gasblasen hin zur Oberfläche führt dann im Zusammenspiel mit den nachfolgend beschriebenen zerstörenden Mechanismen zu einem Entgasen des Schaums, also einer Trennung von kontinuierlicher und disperser Phase.

Für die Blasenbewegungen in ruhenden Schäumen sind Auftriebskräfte verantwortlich. Die Dichteunterschiede zwischen dem dispersen Gas und dem umgebenden kontinuierlichen Fluid sorgen für eine nach oben gerichtete Auftriebskraft. Dieser Auftriebskraft wirkt jedoch eine rückhaltende Kraft entgegen. Unter idealen Bedingungen, d.h. bei einer geringen Viskosität des Fluids und einer kugelförmigen, aufsteigenden Blase, entsteht diese rückhaltende Kraft als Reibungskraft nach dem *Stokeschen* Gesetz:

$$F_R = 6 \cdot \pi \cdot r \cdot \eta \cdot v \quad (2.6)$$

mit:

- F_R = Reibungskraft
- r = Partikelradius
- η = dynamische Viskosität des Fluids
- v = Partikelgeschwindigkeit

Mit zunehmender Viskosität des Fluids wird die Reibungskraft durch eine Druckkraft ergänzt. Diese beruht darauf, dass die mit der Viskosität zunehmende Trägheit des Fluids der für die Partikelbewegung erforderlichen Verformung des Fluids einen Widerstand entgegensetzt. Bei hohen Viskositäten wird die Reibungskraft gegenüber der Druckkraft vernachlässigbar [17]. Handelt es sich um ein Fluid mit einer ausgeprägten Fließgrenze, kann darüber hinaus eine Blasenbewegung nur dann stattfinden, wenn die Auftriebskraft ausreicht, um neben den anderen Widerständen auch diese Fließgrenze des Fluids zu überwinden. Für die Betrachtung an dieser Stelle genügt die Erkenntnis, dass der Auftriebskraft mit zunehmender Fluidviskosität und Fließgrenze eine stärker werdende Kraft entgegengesetzt wird. Eine exakte Berechnung ist nach [13] mangels eines allgemeingültigen Gesetzes bei höheren Viskositäten nicht möglich. Eine etwas

detailliertere Erläuterung speziell zum Entlüften von Zementleim findet sich in [129].

Im vorliegenden Fall eines Schaums wirken die beschriebenen Gesetzmäßigkeiten entsprechend. Allerdings reichen sie bei weitem nicht aus, um das tatsächliche Entlüftungsverhalten zu beschreiben. Zum einen beeinflussen sich die Gasblasen insbesondere bei höheren Gasgehalten gegenseitig in ihrer Bewegung, zum anderen unterliegen die Gasblasen bei einer Bewegung durch das Fluid einer Verformung, die einen erheblichen Einfluss auf die Größe der wirkenden Kräfte hat. Insbesondere die wechselseitige Beeinflussung der Blasen ist nicht direkt mathematisch zu erfassen. Daher gibt es dazu bislang keine zuverlässigen Berechnungsmethoden. Die zuvor dargestellten Gesetzmäßigkeiten zeigen jedoch die relevanten Einflussparameter.

Drainage

Als Drainage wird das Abfließen der flüssigen Phase aus einem Schaum bezeichnet. Auslöser der Drainage sind die Gravitation und kapillare Kräfte zwischen den Lamellen. Infolge der Drainage dünnen die Lamellen aus, was zu einer Veränderung der Volumenanteile von flüssiger und gasförmiger Phase führt. Dadurch kann sich die Schaumstruktur derart verändern, dass im oberen Bereich ein sehr fragiler Schaum entsteht, während im unteren Bereich sehr hohe Fluidanteile vorliegen. Zum einfachen Verständnis kann das Abfließen der Flüssigkeit in dünnen Schaumlamellen wie das Fließen zwischen zwei vertikalen Platten betrachtet werden. Mit steigendem Gasanteil werden die Fließwege zwischen den Blasen enger, der Fließwiderstand wird größer. Mit abnehmender Lamellendicke und Filmbreite verlangsamt sich also die Drainage. Des Weiteren wird durch eine hohe Viskosität der flüssigen Phase der Abfluss vermindert. Es zeigte sich, dass mit Proteinen stabilisierte Schäume langsamer drainieren als Schäume auf Tensidbasis [116]. Weitergehende Untersuchungen der Drainage im Polyederschaum mit wässrigen kontinuierlichen Phasen finden sich in [12, 65, 117]. Ein mathematisches Modell der Drainage entwickelten Koehler et al. [116, 67]. Auf Grund der komplexen Abhängigkeiten unter den Einflüssen auf die Drainage (Volumenverhältnisse zwischen den Phasen, Querschnitte der Lamellen und Knoten, Krümmungen der Blasenwandungen, Grenzflächeneigenschaften, Fließgeschwindigkeit u.v.m) sind bisherige mathematische Beschreibungsansätze sehr komplex und beziehen sich in der Regel ausschließlich

auf Polyederschäume. Für fluide Phasen mit Feststoffpartikeln sind keine mathematischen Modelle zur Beschreibung des Drainageverhaltens bekannt.

Koaleszenz

Wird durch Blasenbewegungen oder Drainage eine kritische Lamellendicke unterschritten, kann es zu einem spontanen Reißen des Flüssigkeitsfilms kommen. Die daraus resultierende Vereinigung zweier Blasen miteinander oder an Schaumoberflächen mit dem umgebenden Gasraum wird als Koaleszenz bezeichnet. Der Koaleszenzvorgang ist eine direkte Folge des Ausdünnens einer Lamelle bis hin zu ihrem Reißen. Daher sind die Vorgänge, die zum Ausdünnen der Lamellen führen, für die Koaleszenz geschwindigkeitsbestimmend. Eine vertiefende Beschreibung der Koaleszenz findet sich in [65].

Ostwald-Reifung

Als Ostwald-Reifung (auch Disproportionierung) wird die Gasdiffusion von kleineren in größere Blasen bezeichnet. Sie tritt folglich vermehrt bei einer ungleichmäßigen Blasengrößenverteilung auf. Die treibende Kraft dieses Prozesses ist die Druckdifferenz zwischen kleinen und großen Blasen. Im Inneren der Blasen herrscht je nach Blasendurchmesser ein unterschiedlicher *Laplace*-Druck (vgl. Abschnitt 2.4.2). Kleinere Blasen haben einen höheren Gasdruck. Das natürliche Streben nach Ausgleich zwischen Konzentrations- bzw. Druckunterschieden und die Möglichkeit der Gasdiffusion in der flüssigen Phase führen zu einem Gastransport von den kleinen in die großen Blasen. Mit der resultierenden Veränderung des Gasgehalts stellt sich für die einzelnen Blasen ein neuer Gleichgewichtszustand zwischen Radius, Grenzflächenspannung und Druck ein. Der Diffusionsprozess schreitet jedoch fort, da die Druckdifferenz zwischen den Blasen weiter ansteigt. Das Ausmaß der Ostwald-Reifung hängt nicht allein von der Blasengrößenverteilung ab. Einfluss haben auch die Gaslöslichkeit, die Temperatur, der Umgebungsdruck, die Lamellendicke und die Grenzflächeneigenschaften der Phasengrenze. Wird der Radius der größeren Blase als unendlich angenommen, kann die zeitliche Abnahme des Radius r der kleineren Blase von der Ausgangsgröße r_0 mit der *de-Vries*-Gleichung beschrieben werden [4].

$$r^2 = r_0^2 - \frac{4 \cdot R \cdot t}{p_0} \cdot \frac{D \cdot L \cdot \sigma}{d_F} \cdot t \quad (2.7)$$

mit:

r_0 = Ausgangsradius der kleineren Blase

r = resultierender Radius der kleinen Blase zum Zeitpunkt t

t = Zeit

R = allg. Gaskonstante

p_0 = atm. Druck

D = Diffusionskoeffizient des Gases in der Flüssigkeit

L = Löslichkeit des Gases in der Flüssigkeit

d_F = Dicke der Flüssigkeitsschicht, über der die Diffusion stattfindet

σ = Grenzflächenspannung zwischen den Phasen

Es hat sich gezeigt, dass die Gaspermeabilität bei mit Proteinen besetzten Grenzflächen mit abnehmender Blasengröße zurückgeht, so dass die Ostwald-Reifung verlangsamt oder sogar gestoppt wird.

2.4.2 Stabilisierende Einflüsse auf den Schaum

Stabilisierende Einflüsse auf den Schaum ergeben sich zum einen aus physikalischen Effekten, zum anderen aus der Zugabe von verschiedenen Zusatzstoffen.

Disjoining Pressure

Wie in Kapitel 2.2 dargestellt, wird die Stabilität der Blasenhülle durch grenzflächenaktive Stoffe erreicht. Diese haben einen hydrophoben und einen hydrophilen Anteil. Wie in Abbildung 2.9 dargestellt, richten sich die Moleküle so aus, dass ihr hydrophiler Anteil in die Flüssigkeit hineinreicht. Nähern sich die Oberflächen des Flüssigkeitsfilms einander an, tritt eine Abstoßung der hydrophilen Moleküle ein, die eine weitere Annäherung der Grenzflächen hemmt. Eine genauere Beschreibung dieses Effekts bietet die DLVO-Theorie [127, 25, 113].

Laplace-Druck

Auf der Innenseite einer gebogenen Grenzfläche, hier auf der Innenseite einer Blase, ist der Druck größer als auf der Außenseite. Dieser Druckunterschied wird als *Laplace-Druck* oder Kapillardruck p_K bezeichnet. Im Falle einer idealen (Hohl-)Kugel mit dem Durchmesser r und je einer Phasengrenzfläche auf der

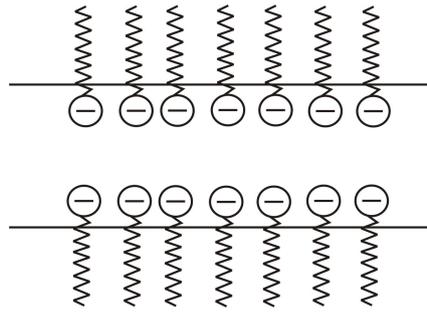


Abbildung 2.9: Abstoßungsdruck durch hydrophile (-) Molekülen, nach [127]

Innen- und Außenseite der Blasenhülle, wird er durch die *Laplace*-Gleichung beschrieben:

$$p_K = \frac{4 \cdot \sigma}{r} \quad (2.8)$$

mit:

- p_K = Kapillardruck
- σ = Oberflächenspannung
- r = Kugelradius

Im Falle einer Blase in einem kontinuierlichen Medium liegt nur eine Grenzfläche vor, weshalb der Kapillardruck, also die Druckdifferenz zwischen dem Inneren der Blase und ihrer Umgebung, nur halb so groß ist:

$$p_K = \frac{2 \cdot \sigma}{r} \quad (2.9)$$

Aus dem Kapillardruck ergibt sich für die Grenzfläche eine formhaltende Kraft. Wirkt eine äußere Kraft radial auf die Grenzfläche bewirkt diese eine Verformung der Blase und eine Veränderung ihres Radius. Dadurch kommt es auch zu einer Veränderung des Kapillardrucks, der der äußeren Kraft entgegenwirkt.

Anders als bei Kugelschäumen wirken sich bei Polyederschäumen Druckunterschiede zwischen dem Inneren einer Blase und ihrer Umgebung (hier den sie umgebenden Blasen) auch auf die Form der umgebenden Blasen aus. Dieses wird an einer veränderten Form der Blasenwandungen deutlich. Im geometrisch idealen Fall eines Polyederschaums aus form- und volumengleichen Poren weisen die Lamellen abgesehen von den Knotenpunkten und Plateaugrenzen keine

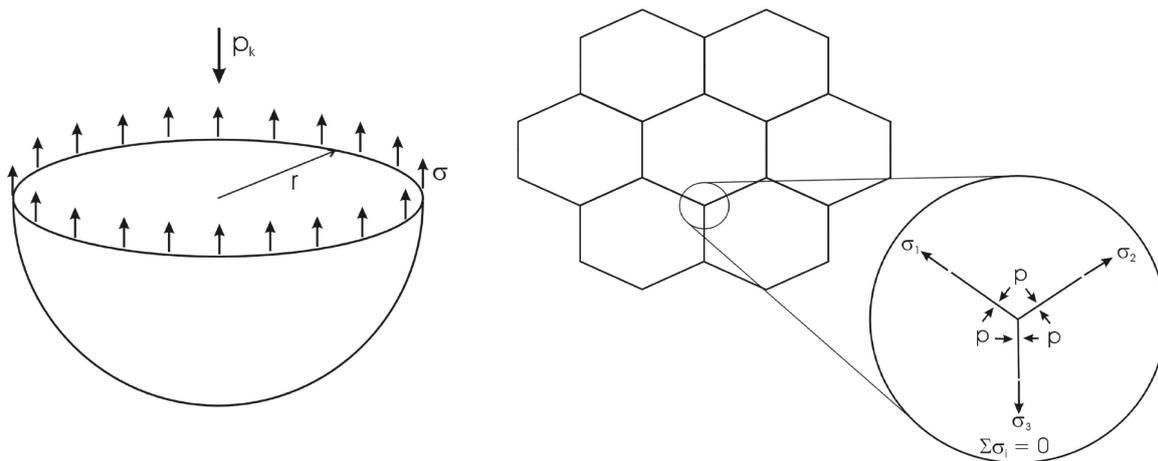


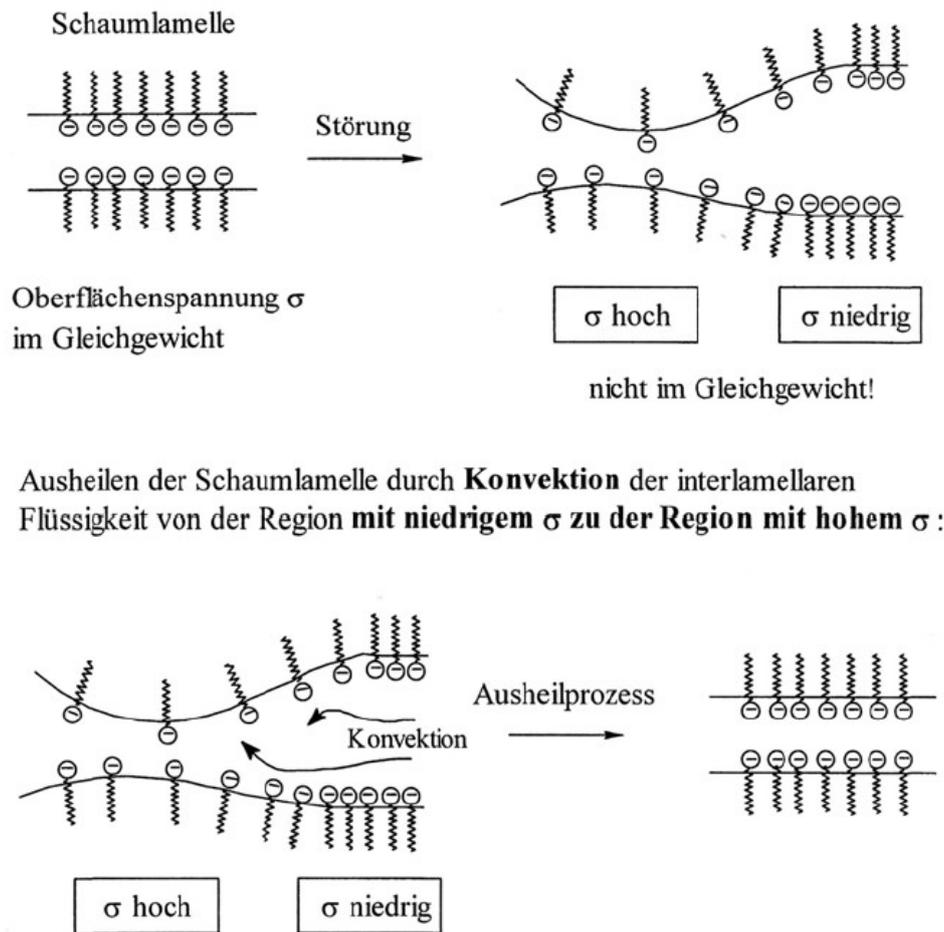
Abbildung 2.10: Kräftegleichgewicht in Blasenwänden, links: Kugelschaum, rechts: Polyederschaum

Krümmung auf (Abbildung 2.10, rechts). Auch hier wirken zwar Zugkräfte in den Blasenwänden, diese werden aber nicht durch den erhöhten Innendruck der Blase ausgeglichen (vgl. Abbildung 2.10, links), sondern durch die Verformung der Blasenwände auf Grund der wechselseitigen Beeinflussung der Blasen. Dabei stehen die einzelnen Knotenpunkte der Lamellen im Gleichgewicht. Bei Polyederschaumen mit unterschiedlich großen Blasen treten beide Effekte nebeneinander auf. Auch hier ist in kleinen Blasen der Innendruck größer als in großen, was zu einer Wölbung der Blasenwand in die große Blase führt. Trotzdem muss an den Knotenpunkten der Lamellen ein Gleichgewicht der angreifenden Zugkräfte herrschen.

Marangoni-Effekt

Kommt es durch äußere Einflüsse auf eine Blase zu einer lokalen Verformung von Blasenwänden mit Dehnung der Grenzfläche, bewirkt dieses vorübergehend einen Grenzflächenspannungsgradienten. Angetrieben von diesem Spannungsgefälle setzt ein Einströmen von Flüssigkeit in den verformten Bereich der Blasenwand sowie eine Wanderung der grenzflächenaktiven Stoffe auf der Grenzfläche und zur Grenzfläche ein. Der Vorgang setzt sich fort, bis eine gleichmäßige Grenzflächenspannung vorliegt (vgl. Abbildung 2.11). So werden Instabilitäten der Blasenhülle behoben.

Allerdings kann eine äußere, tangentielle Strömung bzw. Scherbeanspruchung auch direkt zu einer Verschiebung der grenzflächenaktiven Stoffe und somit zu



Ausheilen der Schaumlamelle durch **Konvektion** der interlamellaren Flüssigkeit von der Region mit **niedrigem σ** zu der Region mit **hohem σ** :

Abbildung 2.11: Schematische Darstellung der Marangoni-Stabilisierung bei Schaumlamellen, nach [104]

einer lokalen Schwächung der Grenzfläche und einem Grenzflächenspannungsgradienten führen.

Gibbs-Effekt

Ebenfalls stabilisierend wirkt der Gibbs-Effekt [65, 104, 123]. Er tritt bei Stauung oder Dehnung einer Schaumlamelle auf. Es wird angenommen, dass sich die Grenzflächenspannungen σ nach der Störung weiterhin im Gleichgewicht befinden. Ursache hierfür ist die so genannte Gibbs-Elastizität E , welche dem Dehnen oder Stauchen der Schaumlamelle entgegenwirkt und diese dadurch vor äußeren Einflüssen schützt. Voraussetzung ist, dass die Tensidkonzentration c_T in der Lösung unter der CMC liegt, so dass sich die Grenzflächenbeladung Γ bei einer Verkleinerung oder Vergrößerung der Grenzfläche verändern kann. Bei Tensidkonzentrationen c_T oberhalb der CMC besitzt die Grenzfläche im

Gleichgewicht mit ihrer Umgebung immer die gleiche Grenzflächenbeladung Γ mit grenzflächenaktiven Molekülen, und eine Gibbs-Stabilisierung findet nicht statt.

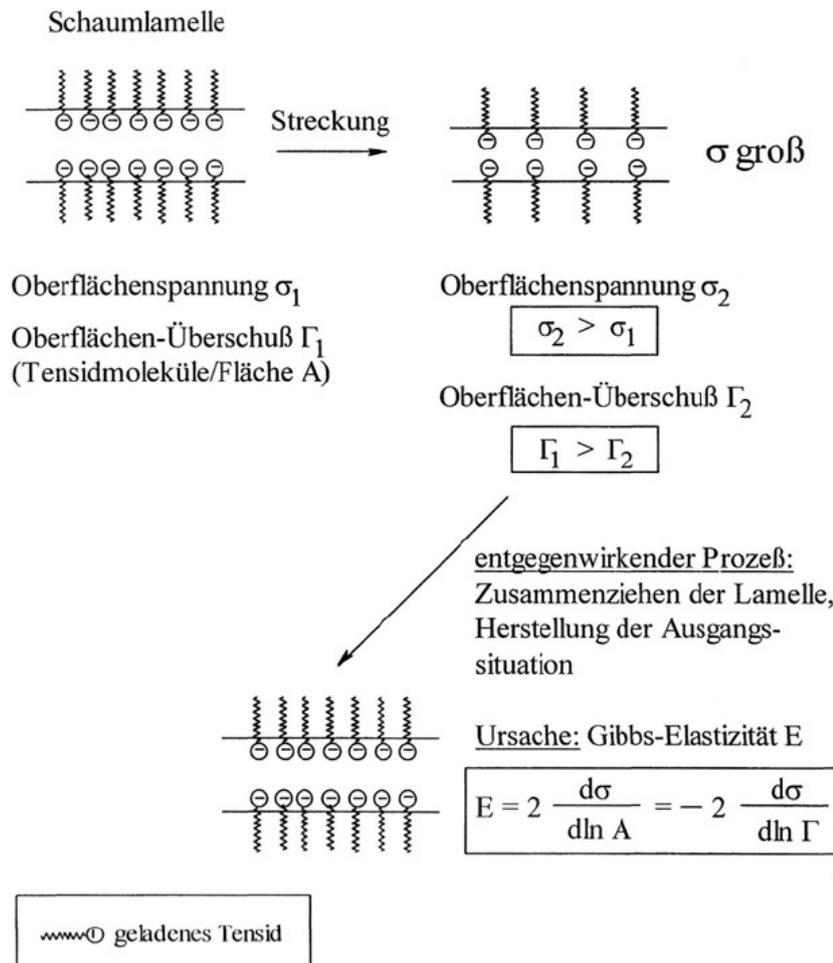


Abbildung 2.12: Schematische Darstellung der Gibbs-Stabilisierung bei Schaumlamellen, nach [104]

Zusätzliche organische Additive

Grenzflächenaktive organische Additive sind die am besten erforschten Schaumzusatzstoffe. Ihre Stabilisierungswirkung beruht darauf, dass sie es den Molekülen an der Grenzfläche ermöglichen, eine sehr dichte Packung zu bilden 2.13. Der so gebildete Film ist elastischer und widerstandsfähiger gegen Drainage und somit auch stabiler gegenüber Störungen. Zu den bekanntesten grenzflächenaktiven organischen Additiven zählen:

- Fettalkohole

- Fettsäuren
- Alkanolamide
- Aminoxide

[65] gibt einen kurzen Überblick über die Auswirkungen der jeweiligen Stoffe und nennt einige Bezugsquellen für die Additive.

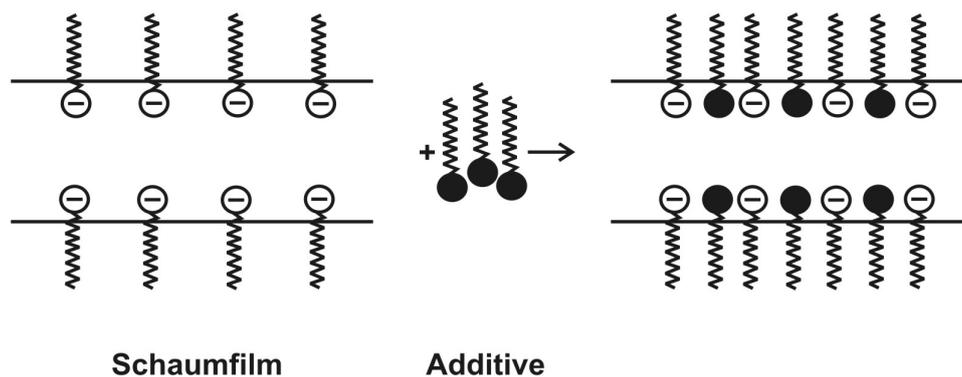


Abbildung 2.13: Schaumstabilisierung durch organische Verbindungen, nach [65]

Für die Auswahl der richtigen organischen Additive gibt es keine allgemein gültige Regel. So vielfältig wie die zur Verfügung stehenden Stoffe, sind auch die publizierten Daten. Nachfolgend sind dennoch einige Grundregeln für den gezielten Einsatz zusammengestellt [65]. Zunächst sollte die Ladung der grenzflächenaktiven Substanzen bestimmt werden. Für anionische oder kationische Schaumsysteme sind nichtionische Additive in der Regel die beste Wahl. Entsprechendes gilt umgekehrt für nichtionische Schaumsysteme. Hier sollten anionische oder kationische Additive verwandt werden. Es ist wichtig, Wechselwirkungen zwischen den Ladungen der grenzflächenaktiven Substanzen und den Additiven zu schaffen. Zudem ist die Kompatibilität zwischen den hydrophoben Elementen der grenzflächenaktiven Substanzen und der Additive zu beachten. Die Kohlenwasserstoffkette des Additivs sollte immer dieselbe Länge aufweisen wie die des Tensids. Die Effektivität des Additivs hängt weiterhin von der Art der Kohlenwasserstoffkette des Tensids ab. Grundsätzlich kann man sagen, dass Schäume basierend auf Tensiden mit geraden Kohlenwasserstoffketten leichter mittels Additiven zu beeinflussen sind als bei Tensiden mit verzweigten Kohlenwasserstoffketten. Beachten sollte man auch den Einfluss der Additive auf die CMC. Der Einsatz eines Additivs führt meist zu einer Herabsetzung der CMC des verwendeten Tensids. Schließlich ist noch ein Augenmerk

auf die Polarität des Additivs zu lenken. Diese ist wesentlich für die Interaktionen zwischen Additiv-, Tensid- und Flüssigkeitsmolekülen verantwortlich. Die Größe der Wechselwirkungen zwischen diesen Molekülen bestimmt maßgeblich die mechanischen Eigenschaften der Grenzfläche und entsprechend die Stabilität des Schaums.

Elektrolyte

Die Stabilität von Schäumen mit anionischen Tensiden kann durch die Zugabe einfacher Elektrolyte verbessert werden. Der Effekt beruht auf Wechselwirkungen der Elektrolyte mit den Kopfgruppen der Tenside (Abbildung 2.14). Es entsteht eine elektrische Doppelschicht entlang der Grenzflächen, welche die Drainageeffekte verringert [101, 20].

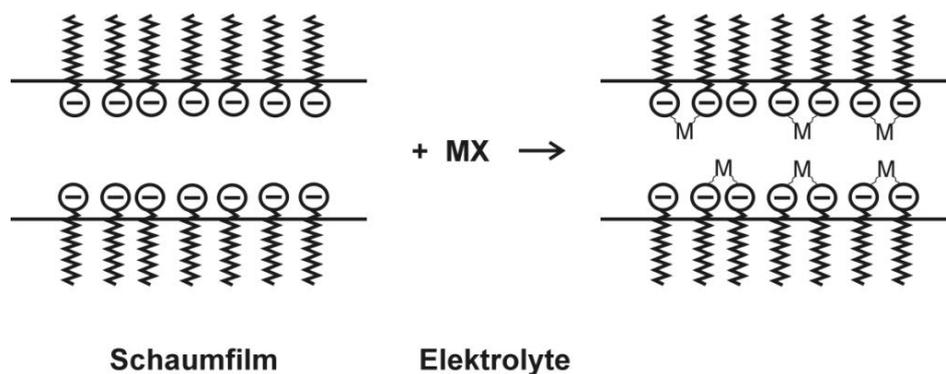


Abbildung 2.14: Schaumstabilisierung durch Elektrolyte, nach [65]

Polymere

Polymere kommen zur Schaumstabilisierung vor allem dort zum Einsatz, wo mit konventionellen Additiven nicht die gewünschten Erfolge erzielt werden können. Wasserlösliche Polymere erhöhen die Viskosität der kontinuierlichen Phase und die Elastizität des Films. Vorteilhaft gegenüber den zuvor beschriebenen organischen Additiven sind insbesondere die hohe Effektivität auch bei geringen Konzentrationen und ihre größere Kompatibilität gegenüber unterschiedlichen Schaumsystemen. Das komplexe Zusammenspiel von Tensiden und Polymeren 2.15 wird in [56] beschrieben.

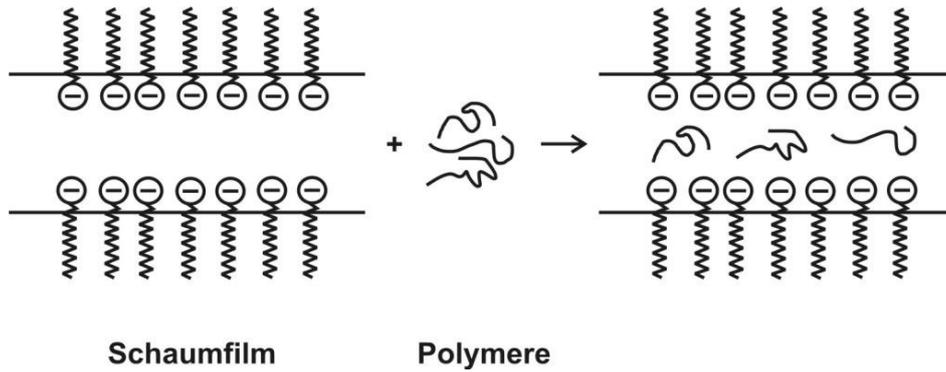


Abbildung 2.15: Schaumstabilisierung durch Polymere, nach [65]

Schaumstabilisierung durch Feststoffpartikel

Neben den zuvor beschriebenen Zweiphasenschäumen aus einer flüssigen und einer gasförmigen Phase können auch sog. Dreiphasenschäume hergestellt werden. Im Bereich der wässrigen Schäume handelt es sich dabei z.B. um Schäume mit eingelagerten Feststoffen. Durch das Einlagern von Feststoffen in die Schaumhülle kann diese sowohl gestärkt als auch geschwächt werden. Im Weiteren wird ein kurzer Einblick in den derzeitigen Stand der Technik zu diesen Stabilisierungs- und Destabilisierungsmechanismen gegeben.

Partikel an Flüssigkeit-Gas-Grenzschichten Trifft ein Feststoffpartikel auf die Grenzfläche Flüssigkeit/Gas, z. B. auf die Schaumhülle einer Blase, kann es in die Flüssigkeit eintauchen. Die jeweilige Eintauchtiefe hängt dabei vor allem von dem Kontraktwinkel θ ab, der seinerseits von den Grenzflächenspannungen der drei betroffenen Phasen bestimmt wird [127]:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{sg} - \sigma_{sl}}{\sigma_{lg}} \quad (2.10)$$

mit:

θ = Kontraktwinkel

σ_{sg} = Grenzflächenspannung
zwischen den Phasen s (solid = Feststoff) und g (Gas)

σ_{sl} = Grenzflächenspannung
zwischen den Phasen s (solid = Feststoff) und l (liquid = Flüssigkeit)

σ_{lg} = Grenzflächenspannung
zwischen den Phasen l (liquid = Flüssigkeit) und g (Gas)

Dabei spielen sowohl die Ausgangsstoffe als auch mögliche (grenzflächenaktive) Zusatzstoffe eine Rolle. Unter Vernachlässigung der Schwerkraft lassen sich so unterschiedliche Benetzungszustände der Partikel beschreiben (vgl. Abbildung 2.16).

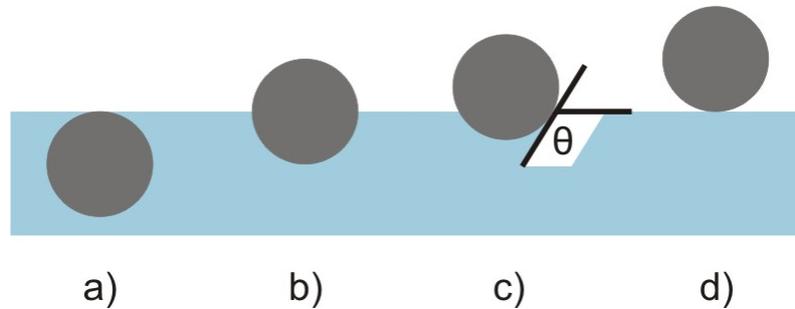


Abbildung 2.16: Verhalten unterschiedlich benetzter Partikel auf einer Flüssigkeitsoberfläche (Schwerkraft vernachlässigt) a) vollständig benetztes Partikel, $\theta = 0^\circ$; b) halb benetztes Partikel, $\theta = 90^\circ$; c) wenig benetztes Partikel, $\theta > 90^\circ$; d) nicht benetztes Partikel, $\theta = 180^\circ$, nach [127]

Partikel in dünnen Flüssigkeitslamellen Sind zwei Blasen hüllen jeweils dicht mit teilweise benetzten Feststoffpartikeln besetzt, verhindern diese Partikel eine dichte Annäherung der Blasen aneinander (vgl. Abbildung 2.17) und somit auch deren Koaleszenz.

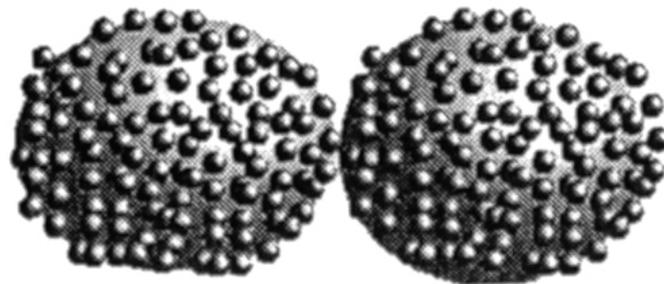


Abbildung 2.17: Schematische Darstellung der Annäherung zweier mit teilweise benetzten Feststoffpartikeln besetzter Blasen, nach [127]

Liegt die Partikelgröße in ähnlicher Größenordnung wie die Filmdicke einer Blase, kann ein Feststoffpartikel auch in die Blasen hülle integriert werden. Dabei treten in Abhängigkeit von dem Kontraktwinkel unterschiedliche Effekte auf.

Überwiegend benetzte Teilchen ($\theta < 90^\circ$) wirken anziehend auf die Oberflächen des Flüssigkeitsfilms, was einer Annäherung der Filmoberflächen entgegenwirkt und daher die Blase stabilisiert (siehe Abbildung 2.18 a).

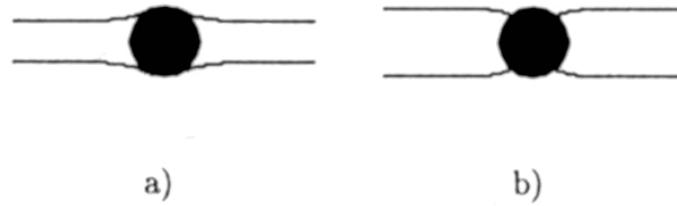


Abbildung 2.18: Schematische Darstellung des Verhaltens eines festen Partikels in einem Flüssigkeitsfilm; a) benetztes Teilchen, b) nicht benetztes Teilchen, nach [127]

Bei schwach oder nicht benetzten Partikeln werden die Flüssigkeitsfilme abgestoßen, was zu einer Annäherung der Filmoberflächen und daher zur Schwächung oder Zerstörung der Blase führt (vgl. Abbildung 2.18 b). Die zuletzt beschriebenen Effekte spielen eine besondere Rolle, wenn die Flüssigkeitsfilme durch Drainagewirkung dünner werden.

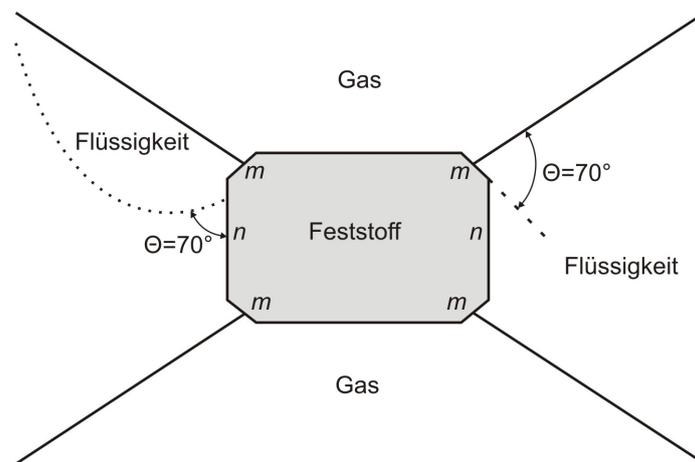


Abbildung 2.19: Schematische Darstellung der Koaleszenzbehinderung durch ein Feststoffpartikel, nach [12]

Günstige Kombinationen aus Partikelgeometrie und Kontraktwinkel können, wie im folgenden Schema dargestellt, die Koaleszenz von Blasen erheblich vermindern. In Abbildung 2.19 wird ein Feststoffpartikel im Kontakt mit zwei Blasen dargestellt. Die Kontrakt- oder Benetzungswinkel θ entlang beider Drei-Phasen-Grenzen betragen ca. 70° . Die Drei-Phasen-Grenzen befinden sich entlang der kleinen Flächen *m*, denn nur diese Position ermöglicht das Anhängen der Blase ohne Verkrümmung, der die Grenzflächenkräfte entgegenwirken. Um am dargestellten Beispiel eine Koaleszenz beider Blasen zu erreichen, wäre es notwendig, dass mindestens eine Drei-Phasen-Grenze entlang der Flächen *n* rutscht. Die Position einer solchen Grenzfläche ist in Abbildung 2.19 in der lin-

ken oberen Ecke als punktierte Linie dargestellt. Es zeigt sich, dass die Ausrichtung dieser Oberfläche nahe der Drei-Phasen-Grenze, wo ebenfalls ein Benetzungswinkel von annähernd 70° aufrechterhalten wird, zu einer Verkrümmung der Blase führt. Dazu ist eine Arbeit (= zusätzlicher Energieaufwand) entgegen der Grenzflächenspannung erforderlich. Im gezeigten Fall ist die Koaleszenz zweier durch benetzte Feststoffpartikel geschützter Blasen daher unwahrscheinlicher als die Verbindung zweier ungeschützter Blasen. Ein Drei-Phasen-System kann somit, wenn Partikelform und Kontraktwinkel zueinander passen, wesentlich stabiler sein als ein Zwei-Phasen-System. Ist diese Bedingung nicht erfüllt (z.B. rechteckige Partikel mit Kontraktwinkeln $> 90^\circ$) kann es jedoch auch zu einer zusätzlichen Destabilisierung des Schaums kommen.

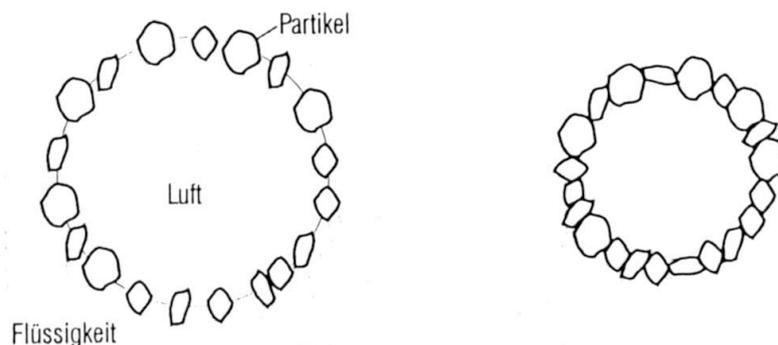


Abbildung 2.20: Stabilisierung einer Luftblase durch feste Partikel, nach [10]

Nach [10] wirkt der Besatz einer Blasenhülle mit Feststoffpartikeln auch der Disproportionierung (Ostwald-Reifung) entgegen, da die festen Partikel bei Verringerung der Blasenoberfläche eine aussteifende Wirkung entwickeln (Abbildung 2.20) und so eine weitere Reduzierung des Blasendurchmessers verhindern.

In Untersuchungen aus dem Bereich der angewandten Chemie ist es gelungen, wässrige Schäume gezielt durch die Zugabe von (silikatischen) Kieselerde-Nanopartikeln zu stabilisieren, die mit einer hydrophoben Schicht überzogenen waren. Diese agieren dabei je nach Grad der Hydrophobie wie grenzflächenaktive Stoffe, können jedoch von den Grenzflächen nicht wieder desorbiert werden. Bei anfänglicher koaleszenzbedingter Verringerung der Gesamtoberfläche der Poren kommt es so zu einer sehr dichten, stabilisierenden und gerüstbildenden Besetzung der Porengrenzflächen durch die Nanopartikel [53]. Nach [108] konnte die Stabilität von Schäumen, insbesondere auch in Gegenwart von Elektrolyten (hier NaCl), durch hydrophobe Siliciumoxid-Teilchen deutlich verbessert werden. Dabei spielt die Größe der Teilchen eine wesentliche Rolle. In den Ver-

suchen wurden Teilchen von 20 nm bis 770 nm untersucht und es wurde deutlich, dass die Schaumstabilität mit geringerem Durchmesser der Siliciumoxid-Teilchen verbessert wird. Dabei wird insbesondere das Entwässern des Schaums unter der Gravitation sehr stark verringert, so dass im besten Fall die Gasdiffusion zwischen den Blasen zum bestimmenden Faktor für die Schaumstabilität wird.

2.5 Herstellungsverfahren für Schäume

Das Herstellen von Schäumen erfolgt durch Einbringen von Luftblasen in eine Flüssigkeit. Dabei lassen sich die vier verschiedenen, im Folgenden aufgeführten und erläuterten Verfahren unterscheiden:

- Dispergieren eines Gases in einer Flüssigkeit
- Membranaufschäumen
- Aerosolverfahren
- chemischer Gaseintrag (vgl. Abschnitt 2.1.4)

2.5.1 Dispergieren eines Gases in einer Flüssigkeit

Die Schaumerzeugung durch Dispergieren eines Gases in einer Flüssigkeit baut in der Regel auf mechanischen Mischsystemen auf. Durch die beim Mischen entstehenden Scherkräfte wird das umgebende Gas in Form von Blasen in die Flüssigkeit eingetragen. Diese Blasen werden durch in der Flüssigkeit vorhandene grenzflächenaktive Stoffe stabilisiert (s. Abschnitt 2.3).

Sind bei weiterem Mischen (= zusätzlicher Energieeintrag) die destabilisierenden Scherkräfte größer als die stabilisierenden Grenzflächenkräfte, wird die disperse Phase weiter zerkleinert, d.h. die Blasengröße nimmt weiter ab (vgl. Abbildung 2.21). Grenzflächenaktive Stoffe mit hoher Adsorptionsgeschwindigkeit besetzen die neu gebildeten Grenzflächen zeitnah nach ihrer Entstehung. Die Blasen werden also schnell stabilisiert. Bei geringer Adsorptionsgeschwindigkeit der grenzflächenaktiven Stoffe wird die Grenzfläche erst nach und nach besetzt, so dass unmittelbar nach der Entstehung von Blasen schon erste Zusammenschlüsse (Koaleszenzvorgänge) erfolgen. Der mittlere Blasendurchmesser wird somit größer (vgl. Abbildung 2.21).

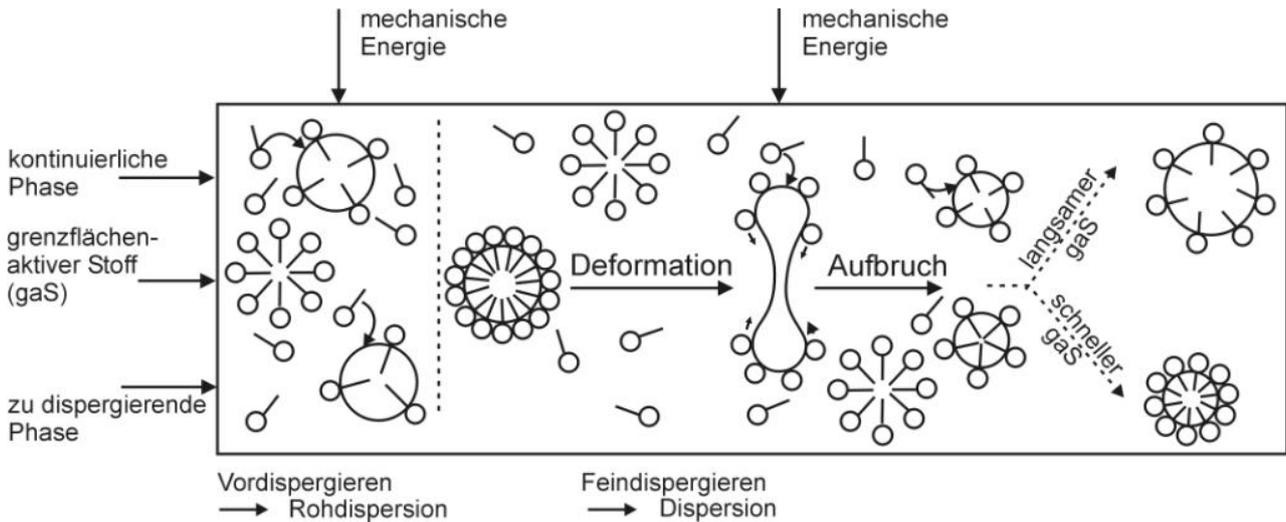


Abbildung 2.21: Prinzipskizze Dispergieren von Gas in Flüssigkeit, nach [4]

Hinsichtlich der Gerätetechnik kommen für das Dispergieren von Gasen in Flüssigkeiten sowohl statische als auch dynamische Mischer in Frage. Bei den statischen Mixern handelt es sich meist um Rohre mit speziellen Einbauten. Sie teilen das zunächst inhomogene Mischgut immer wieder in einzelne Stränge auf, verändern deren Fließrichtung und vereinen sie dann wieder mit anderen Strömen, bis das Mischgut homogenisiert wurde. Ein einfaches Beispiel dafür stellt der Kenics-Mischer aus Abbildung 2.22 dar. Es sind jedoch auch deutlich kompliziertere Geometrien üblich. Statische Mischer werden über die Form der Einbauten sowie die Mischerlänge an die jeweilige Mischaufgabe angepasst. Für eine effiziente Mischleistung sind daher bereits bei der Auslegung des Mixers möglichst genaue Kenntnisse über die Mischguteigenschaften erforderlich.

Dynamische Mischer sind durch bewegliche Mischwerkzeuge gekennzeichnet. Bauart, Geometrie und Funktionsweisen dieser Mischertypen sind sehr vielfältig. Im Bereich der Betontechnologie werden im Wesentlichen Rührwerke und Freifallmischer eingesetzt. Eine Übersicht über verschiedene Mischertypen kann u. a. [122, 68] entnommen werden. Im Freifallmischer wird ein Teil des Mischguts, meist durch rotierende Bewegungen des Mischbehälters, angehoben, um dann im freien Fall auf den Rest des Mischguts herabzufallen und sich so mit diesem zu durchmengen. Da sowohl die relativ geringe eingebrachte Mischenergie als auch die Strömungsverhältnisse in Freifallmischern für das Begasen von Fluiden eher ungünstig sind, wird im Weiteren nur auf die Verwendung von Rührwerken eingegangen. Diese haben den Vorteil einer hohen Flexibilität hinsichtlich der Strömungszustände, die in ihnen eingestellt werden können [132].

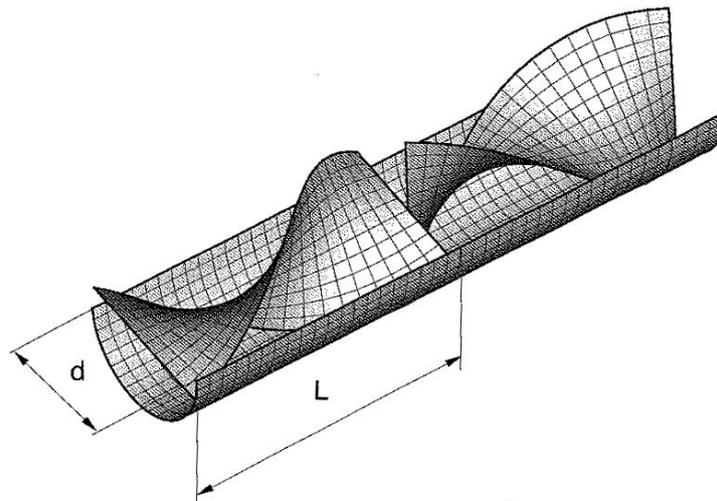


Abbildung 2.22: Skizze zweier Segmente eines Kenics-Mischers, nach [128]

Aus verfahrenstechnischer Sicht handelt es sich bei der Schaumerzeugung, bzw. beim Begasen einer Flüssigkeit, um das Eintragen und Dispergieren eines Gases in der Flüssigkeit. Daraus wird deutlich, dass im Rührwerk zwei Verfahrensschritte ablaufen müssen. Zum einen müssen erhebliche Mengen Luft in Form von Blasen in das Mischgut eingebracht werden, zum anderen müssen diese meist großen Luftblasen durch Scherkräfte mehrfach zerteilt und als kleine Blasen möglichst homogen in der kontinuierlichen Phase verteilt werden. Der Lufteintrag kann nach Abbildung 2.23 auf vier verschiedene Arten erfolgen [122, 132]:

- Selbstansaugende Begasung unter Verwendung von Hohlrührern und Hohlwellen, bei denen durch den Unterdruck auf der Rückseite der Rührorgane Luft durch Rührer und Welle von außen angesaugt wird
- Trombenbegasung durch Ausbildung einer Trombe um die Welle; ausgehend von Fliehkräften, die auf das rotierend bewegte Fluid einwirken, wird Luft unmittelbar an das Rührorgan herangeführt und dort dispergiert
- Fremdbegasung durch den Einsatz von Lanzen o.ä., die Luftblasen an das Rührorgan heranzuführen
- Fremdbegasung durch flächige Luftzufuhr, z.B. durch Siebböden, die unmittelbar eine räumliche Verteilung der Luftblasen in der Flüssigkeit ermöglichen

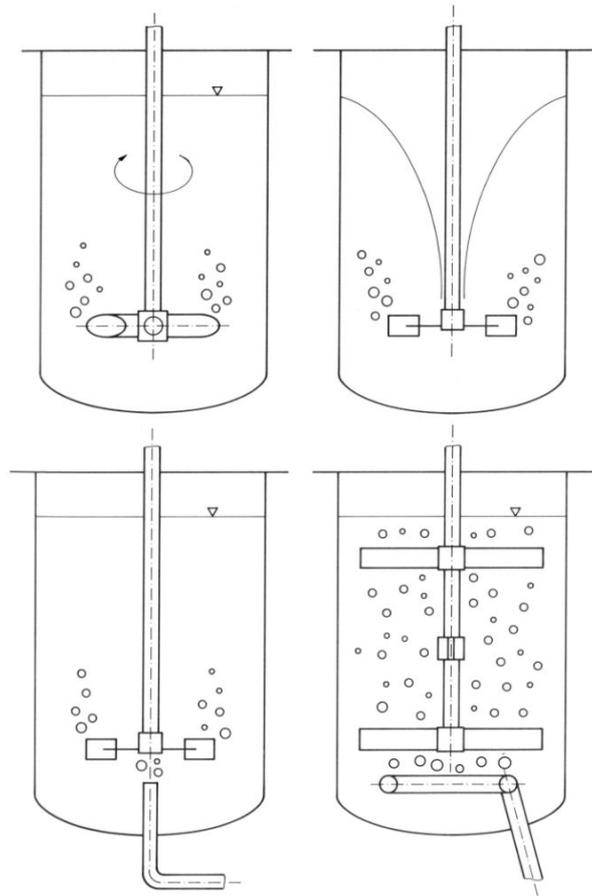


Abbildung 2.23: Begasungsmöglichkeiten, nach [122]

Die Verfahren der Fremdbegasung sind nicht unmittelbar von der Geometrie des Mischorgans oder der Drehzahl abhängig, sondern können über den angelegten Druck sowie den Querschnitt oder das Lochbild an der Einleitstelle gesteuert werden. Sowohl die selbstansaugende Begasung als auch die Trombenbegasung sind hingegen direkt von der Geometrie des Mischorgans und seiner Drehzahl bestimmt und können nur über diese Parameter beeinflusst werden. Diese Parameter bestimmen gleichzeitig auch die Dispergierwirkung des Rührwerks. Daher muss bei der Auslegung von Rührwerken, die sowohl Dispergierung als auch eine Begasung ohne zusätzliche Luftzufuhr ermöglichen sollen, auf einen geeigneten Kompromiss für beides geachtet werden.

Bei dem Design der Mischorgane ist die Kenntnis über die angestrebten Strömungszustände, die optimale Förderrichtung sowie die Größenordnung der Viskosität des Mischguts von wesentlicher Bedeutung [33]. Da bei vielen Mischaufgaben das Einbringen von Luft unerwünscht ist, sind Rührorgane z.T. gezielt darauf ausgelegt, Lufteinschlüsse zu minimieren oder auszutreiben. Bei der Ver-

wendung von Mischern, die primär für einen anderen Zweck als das Begasen konstruiert sind, ist daher ggf. zu prüfen, ob bei der bestehenden Konfiguration des Mixers überhaupt ein Begasen erfolgt.

Einflussgrößen für die Schaumerzeugung

Das Dispergieren von Gas in einer kontinuierlichen fluiden Phase wird zunächst von den im Fluid übertragenen Schubspannungen und den blasenstabilisierenden Kräften, speziell dem Laplace-Druck nach Gleichung 2.8, bestimmt [125]. Deren dimensionsloses Verhältnis wird durch die Weber-Zahl We beschrieben:

$$We = \frac{\tau \cdot r}{4 \cdot \sigma} = \frac{\tau}{p_K} \quad (2.11)$$

mit:

We	= Weber-Zahl
τ	= Schubspannung
σ	= Oberflächenspannung
p_K	= Laplace-Druck
r	= Porenradius

Die Bestimmung der Schubspannung τ gestaltet sich sehr komplex. Grundsätzlich sind hier zwei Strömungszustände zu unterscheiden:

- laminare Strömung
- turbulente Strömung

Die Charakterisierung der Strömungsverhältnisse erfolgt über die Reynold-Zahl Re , die von der Mischergeometrie, dem Energieeintrag und den Fluideigenschaften abhängig ist:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot l}{\eta} \quad (2.12)$$

mit:

Re	= Reynold-Zahl
ρ	= Dichte des Fluids
η	= dynamische Viskosität des Fluids
v	= Geschwindigkeit
l	= Länge

Bei allen zuvor genannten Größen handelt es sich jeweils um charakteristische Größen des Gesamtsystems zum Zeitpunkt der Betrachtung. Hier spielen sowohl die Geometrie und Bauart des Mixers, die Menge und diverse Eigenschaften des Mischguts aber auch der Zufall eine wesentliche Rolle. Eine pauschale Abschätzung der Größenordnungen ist daher nicht möglich. Für jedes System gibt es eine kritische Größe für die Reynold-Zahl, bei deren Überschreiten sich die Strömung von einer laminaren in eine turbulente verwandelt.

Für laminare Strömungen können die auftretenden Schubspannungen τ prinzipiell durch Umstellen der Gleichung 2.13 als Funktion der Viskosität sowie der Scherrate bzw. Schergeschwindigkeit ausgedrückt werden. Detailliertere Informationen zu den Zusammenhängen zwischen Viskosität, Schubspannung und Schergeschwindigkeit können z.B. [97, 6, 5, 54] entnommen werden.

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.13)$$

mit:

η	= Viskosität
τ	= Schubspannung
$\dot{\gamma}$	= Schergeschwindigkeit

In dynamischen Mixern ist allerdings zu beachten, dass es sich in der Regel nicht um einen homogenen Strömungszustand handelt. Daher ist eine explizite Berechnung nicht möglich.

In turbulenten Strömungen ergeben sich nach [125, 47, 68] weitere Abhängigkeiten, u.a. von entstehenden Trägheitskräften, Wechselwirkungen zwischen Fluidviskosität und Blasen sowie Blasengrößen. Turbulente Strömungen sind numerisch bisher nicht direkt zu beschreiben. Es gibt lediglich einige Ansätze zu numerischen Simulationen [68], auf die hier jedoch nicht näher eingegangen wird.

Während das Vermischen von Gasen in niederviskosen Flüssigkeiten sehr einfach in turbulenten Strömungsfeldern erfolgt, ist für höherviskose Flüssigkeiten das Erreichen eines turbulenten Strömungsfeldes, soweit mit dem gewählten Mischertyp überhaupt möglich, in der Regel mit einem sehr hohen Energieeintrag verbunden. Dieser führt zu einer erheblichen Erhöhung der Mischguttemperatur. Daher ist nach [68] für hochviskose Flüssigkeiten eher ein laminarer Strömungszustand oder ein Strömungszustand im Übergangsbereich laminar-turbulent zu empfehlen.

Für statische Mischer kann beim Dispergieren einer niederviskosen Phase (z.B. Luft) in einer hochviskosen Phase der größte stabile Blasendurchmesser nach [68] wie folgt abgeschätzt werden:

$$d_{max} = k_l \frac{2\sigma}{\dot{\gamma}\eta_c} \left(\frac{\eta_d}{\eta_c} \right)^{-q} \quad (2.14)$$

mit:

- d_{max} = maximaler Blasendurchmesser
- k_l = Konstante abhängig von Mischer bzw. Scherfeld
- σ = Oberflächenspannung
- $\dot{\gamma}$ = Schergeschwindigkeit
- η_c = Viskosität der kontinuierlichen, hochviskosen Phase
- η_d = Viskosität der dispersen, niederviskosen Phase
- q = Konstante abhängig von Mischer bzw. Scherfeld

Voraussetzung für das Dispergierergebnis ist eine ausreichende mittlere Verweilzeit im Scherfeld, die wiederum von der Anfangsgröße der Blasen abhängt. Die Anfangsgröße der Blasen richtet sich nach der Geometrie an der Einleitstelle, den Druckverhältnissen sowie den Eigenschaften der kontinuierlichen Phase. Die wesentlichen Zusammenhänge zum Lufteintrag entsprechen den im folgenden Kapitel 2.5.2 dargestellten.

2.5.2 Membranaufschäumen

Beim Aufschäumen mit mikroporösen Membranen wird die disperse Phase (das Gas) von außen durch die Poren einer Membran direkt in die im Inneren fließende kontinuierliche Phase hineingedrückt und dispergiert (siehe Abbildung

2.24). In Abhängigkeit der Porendurchmesser der Membran, der Fließgeschwindigkeit sowie rheologischer Eigenschaften der kontinuierlichen Phase und dem Druck der Gasphase variieren die Porendurchmesser. Das Membranaufschäumverfahren ist auf Grund des geringen erforderlichen Energieeintrags ein relativ schonendes Aufschäumverfahren.

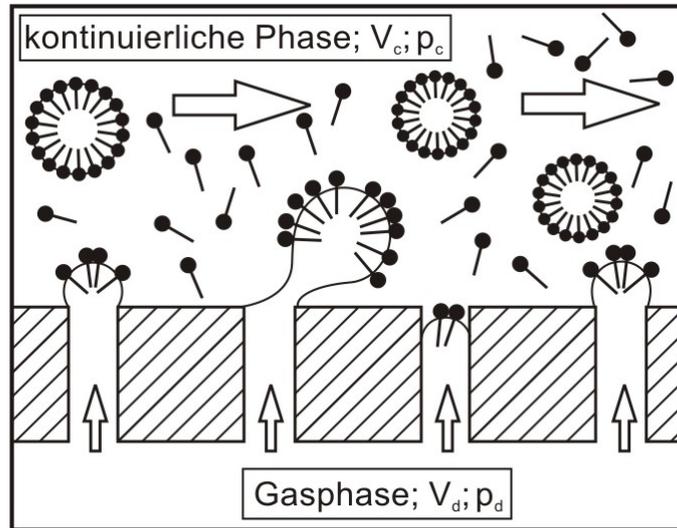


Abbildung 2.24: Prinzipskizze Membranaufschäumen, nach [4]

Einflussgrößen für die Schaumerzeugung

Bei der Blasenbildung an Membranen sind die in Abbildung 2.25 dargestellten Kräfte von Bedeutung.

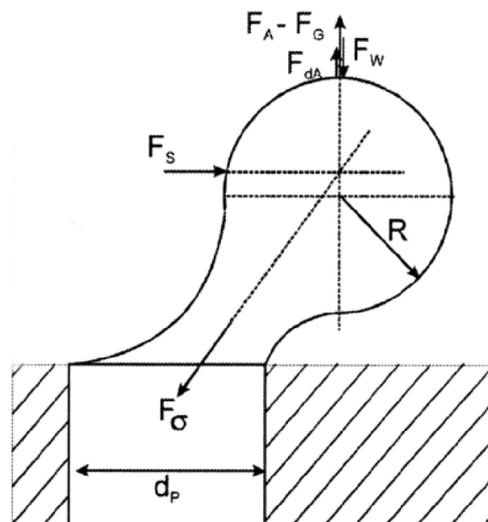


Abbildung 2.25: Wirkende Kräfte bei der Blasenbildung an Membranen etc., nach [4]

Die wirkenden Kräfte können in haltende und ablösende Kräfte unterteilt werden. Durch das die Membran durchströmende Gas wölbt sich über der Öffnung zunächst ein Kugelabschnitt, der langsam größer wird und sich unter dem Einfluss der Fluidströmung verformt. Die Blase bleibt dabei solange durch einen Verbindungsschlauch mit der Öffnung verbunden, bis die ablösenden Kräfte überwiegen.

Als haltende Kräfte wirken dabei die Grenzflächenkraft F_σ sowie der Widerstand F_W , welcher der Blasenbildung durch das umgebende Medium entgegengebracht wird und einen Widerstandsbeiwert c_W beinhaltet. Es gilt:

$$F_\sigma = d_p \cdot \pi \cdot \sigma(t) \quad (2.15)$$

mit:

F_σ = Grenzflächenkraft
 $\sigma(t)$ = Grenzflächenspannung zum Zeitpunkt der Betrachtung
 d_p = Durchmesser der Öffnung

$$F_W = c_W \cdot \frac{v_B^2 \cdot \rho_{Fl}}{2} \cdot \frac{d_B^2 \cdot \pi}{4} \quad (2.16)$$

mit:

F_W = Widerstandskraft des Fluids
 c_W = Widerstandsbeiwert
 v_B = Relativgeschwindigkeit der Blase zum Fluid
 ρ_{Fl} = Dichte des Fluids
 d_B = Durchmesser der Blase

Für den Widerstandsbeiwert c_W werden in der Literatur zahlreiche Zusammenhänge genannt. Nach [4] bietet eine stark vereinfachte Abschätzung auf Grundlage der Reynold-Zahl eine hinreichend genaue Näherung, aus der die wesentlichen Einflussfaktoren hervorgehen:

$$c_W = \frac{12 \cdot \eta}{v_{Fl} \cdot d_{St} \cdot \rho_{Fl}} \quad (2.17)$$

mit:

- c_W = Widerstandsbeiwert
 η = Viskosität des Fluids
 v_{Fl} = Relativgeschwindigkeit des Fluids zur Blase
 ρ_{Fl} = Dichte des Fluids
 d_{St} = charakteristischer Durchmesser der Fluidströmung

Als ablösende Kräfte ergeben sich die aus dem Dichteunterschied von Gas und Fluid resultierende Auftriebskraft $F_A - F_G$, die Strömungskraft der kontinuierlichen Phase F_S sowie eine dynamische Auftriebskraft F_{dA} , die sich ggf. aus dem asymmetrischen Anströmen der Blase ergibt [4]:

$$F_A - F_G = \Delta\rho \cdot g \cdot V_B \quad (2.18)$$

mit:

- F_A = Auftriebskraft
 F_G = Gewichtskraft
 $\Delta\rho$ = Dichteunterschied von Gas und Fluid
 g = Erdbeschleunigung
 V_B = Volumen der Blase

$$F_S = c_W \cdot \frac{v_{Fl}^2 \cdot \rho_{Fl}}{2} \cdot \frac{d_B^2 \cdot \pi}{4} \quad (2.19)$$

mit:

- F_S = Strömungskraft des Fluids
 c_W = Widerstandsbeiwert
 v_{Fl} = Relativgeschwindigkeit des Fluids zur Blase
 ρ_{Fl} = Dichte des Fluids
 d_B = Durchmesser der Blase

$$F_{dA} = 0,76 \cdot \frac{\tau_W^{1,5} \cdot d_B^3 \cdot \rho_{Fl}}{\eta_{Fl}} \quad (2.20)$$

mit:

- F_{dA} = dynamische Auftriebskraft
 τ_W = Scherspannung an der Blasenwand
 d_B = Durchmesser der Blase
 ρ_{Fl} = Dichte des Fluids
 η_{Fl} = Viskosität des Fluids

In der Praxis stellen sich in den meisten Anwendungsfällen instationäre Strömungsverhältnisse ein, die eine geschlossene Berechnung der dargestellten Gleichungen nicht möglich machen. Dennoch zeigen die Abhängigkeiten den erheblichen Einfluss der Fluidviskosität sowie der Fluidichte auf die Blasenbildung.

Mit zunehmendem Gasvolumenstrom in die Blasen verändert sich das Blasenbild (vgl. Abbildung 2.26). Es können drei Arten der Blasenbildung unterschieden werden [41]:

- Einzelblasenbildung (wie zuvor beschrieben)
- Blasengasen
- Strahlgasen

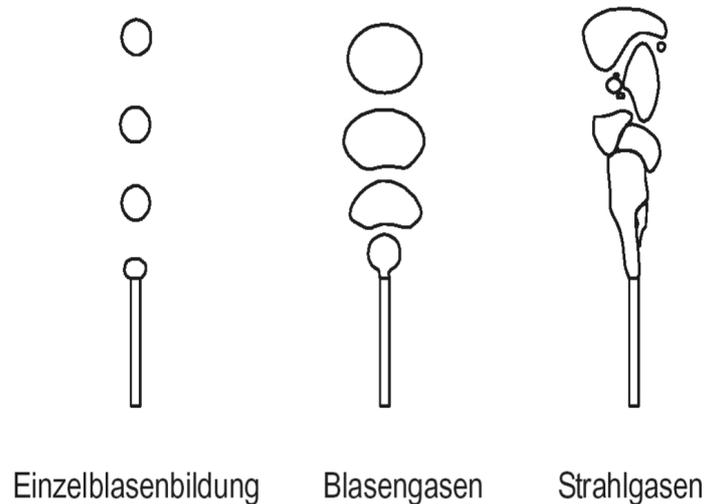


Abbildung 2.26: Veränderung des Blasenbildes mit zunehmendem Gasvolumenstrom, nach [41]

Die zuvor beschriebene Einzelblasenbildung erfolgt bei sehr niedrigen Gasdurchsätzen, weshalb sie technisch selten relevant ist. Sie liefert bei gleichbleibenden Verhältnissen praktisch konstante Blasengrößen. Bei steigendem Gasvolumenstrom durch die Düse steigt nur die Blasenfrequenz an. Beim Blasengasen bildet

sich eine Blasenkette. Die hintereinander aufsteigenden Blasen beeinflussen sich gegenseitig. Die Blasengröße vergrößert sich mit steigendem Gasdurchsatz. Ab einem bestimmten kritischen Gasvolumenstrom besteht keine Möglichkeit mehr, die Gasmenge in Form einzelner Blasen zu transportieren. Die nacheinander gebildeten Blasen stoßen gegeneinander bzw. die trennende Lamelle zwischen einer Blase und der folgenden wird jeweils bei der Entstehung der Folgeblase durch den starken Gasstrahl zerstört. Obwohl in technischen Systemen häufig hohe Gasdurchsätze notwendig sind und somit Strahlgasen auftritt, existiert wegen der auftretenden extrem komplexen Strömungsfelder bislang kein allgemein anerkanntes Modell zur Beschreibung des Strahlgasens [41].

2.5.3 Aerosolverfahren

Das Aerosol- oder Kondensationsverfahren bezeichnet das Entstehen von Schaum auf Grund von Druckunterschieden. Dabei wird eine Flüssigkeit unter erhöhtem Druck mit einem Gas gesättigt. Beim Entspannen der Flüssigkeit, z.B. an Querschnittsaufweitungen, wird dann das Gas in Form von Blasen freigesetzt [4]. Neben den auftretenden Druckunterschieden spielen dabei auch noch andere Parameter wie z.B. Scherkräfte eine Rolle [49].

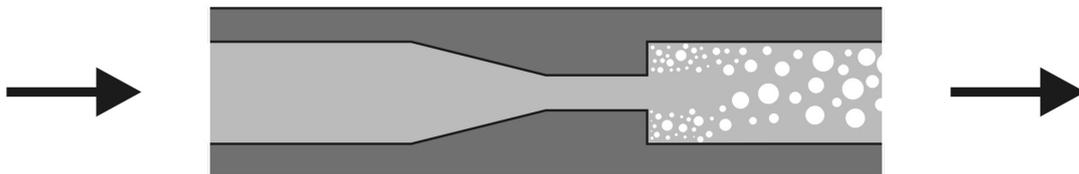


Abbildung 2.27: Prinzipskizze Entspannen einer mit Gas übersättigten Flüssigkeit, nach [49]

Das Aerosolverfahren hat für das Aufschäumen von Zementleimen nur eine untergeordnete Bedeutung, da die Verfahrenstechnik sehr aufwändig ist und bei dem relativ geringen Flüssigkeitsanteil am Gesamtleimvolumen nur eine begrenzte Gasmenge gelöst werden kann. Daher wird dieses Verfahren hier nicht näher betrachtet.

2.6 Rheologie und Fließverhalten von Schäumen

Die grundlegenden rheologischen Zusammenhänge für Flüssigkeiten (vgl. [97, 6]) sind prinzipiell auch für flüssige Schäume gültig. Da es sich bei Schäumen jedoch nicht um homogene, sondern um mehrphasige Systeme handelt, spielen für die Rheologie weitere Einflüsse eine Rolle. Vielfach ist die Struktur des Schaums im Verlauf von Fließvorgängen nicht konstant. In Abhängigkeit der Schaumstabilität und der wirkenden Scherkräfte kann es sowohl zu einer Blasenzerkleinerung und damit verbundenen zunehmenden Strukturstabilität, aber auch zu Blasenkoaleszenz bis hin zur Phasentrennung kommen (vgl. Abbildung 2.28). Diese Problematik schränkt auch die messtechnischen Möglichkeiten ein, da bei den bekannten Apparaturen zur Messung der rheologischen Kennwerte nicht sichergestellt ist, dass die Schaumstruktur erhalten bleibt [104]. Daher weisen die gemessenen Daten in der Regel keine Praxisrelevanz auf.

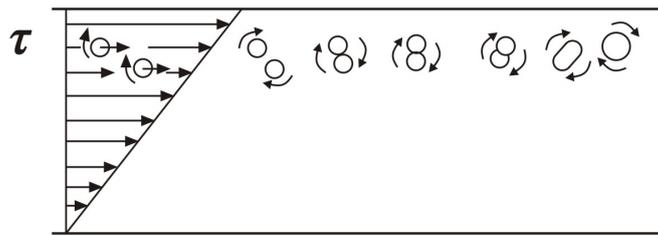


Abbildung 2.28: Bläschenkoaleszenz durch Kollision im Scherfeld, aus [119]

Nach umfangreicher Literaturlauswertung kommt Bals in [4] zu folgenden Aussagen:

- Bei der Schaumerzeugung ist mit dem Einbringen der dispersen Phase und der Bildung einer inneren Oberfläche ein starker Viskositätsanstieg verbunden.
- Das resultierende Fließverhalten eines Schaums kann nicht aus den rheologischen Eigenschaften der Phasen abgeleitet werden.
- Unter der Voraussetzung, dass die Blasenquerschnitte im Verhältnis zu den Fließquerschnitten klein sind, können Schäume als nicht newtonsches, strukturviskoses Fluid mit ausgeprägter Fließgrenze charakterisiert werden. Sie widerstehen also einer Scherung bis zu einer gewissen Schubspannung und danach nimmt die Schergeschwindigkeit bei zunehmender Schubspannung überproportional zu.

In [119] wird ein Modell für das Viskositäts- und Strukturverhalten mehrphasiger Stoffsysteme in Abhängigkeit von der Scherrate $\dot{\gamma}$ (= Schergeschwindigkeit) beschrieben (Abbildung 2.29).

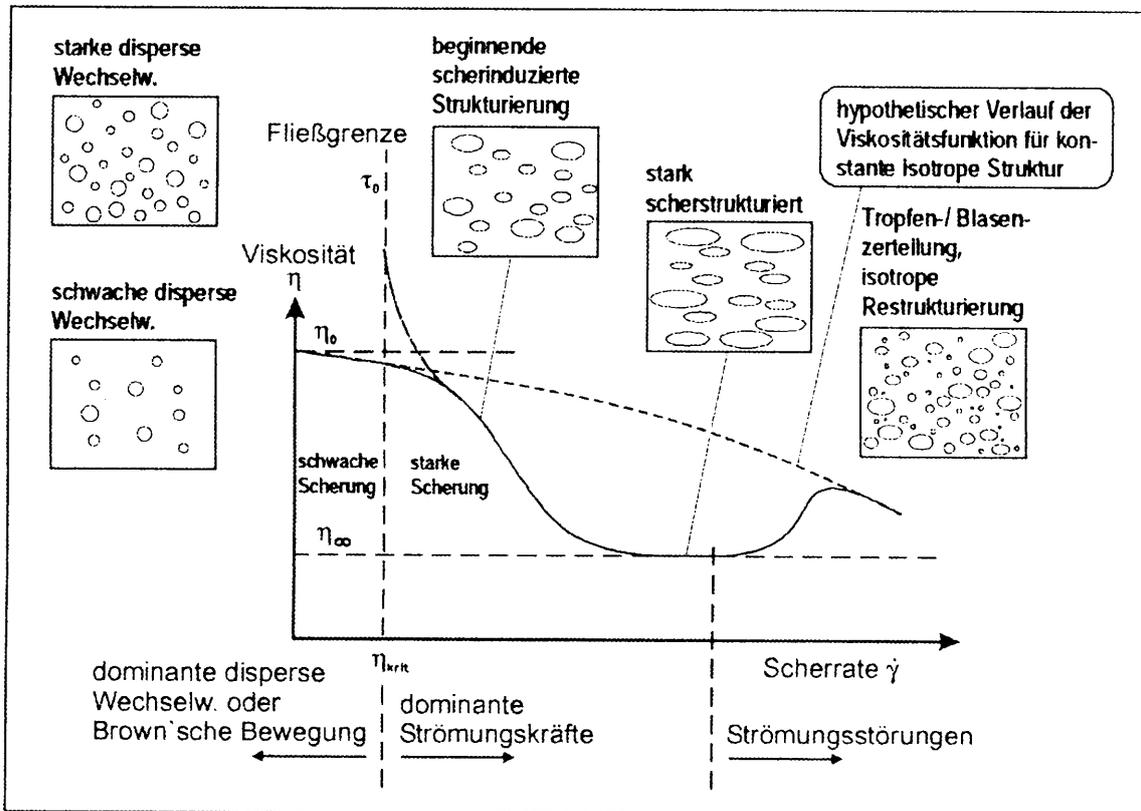


Abbildung 2.29: Modell für das Viskositäts- und Strukturverhalten mehrphasiger Stoffsysteme, nach [119]

Darin wird deutlich, dass die Viskosität von Schäumen mit zunehmender Scherbeanspruchung zunächst deutlich abnimmt, da sich durch Deformation der dispersen Gasphase eine gerichtete Blasenstruktur ausbildet, die zu einer geringeren inneren Reibung bzw. Verzahnung führt. Bei sehr hohen Scherbeanspruchungen kommt es hingegen, wie bereits angesprochen, zu einer zunehmenden Dispergierung der Gasphase. Die entstehenden kleineren Blasen haben nach Gleichung 2.8 einen höheren Laplacedruck, was zu einer geringeren Verformbarkeit der Blasen führt. Daher kommt es bei sehr hohen Scherbeanspruchungen zu einem erneuten Ansteigen der Viskosität.

Einen weiteren nennenswerten Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften von Schäumen hat der Umgebungsdruck. Da die Gasphase kompressibel ist, führen Veränderungen im Umgebungsdruck unmittelbar zu einer Veränderung der Blasenstruktur mit den beschriebenen Einflüssen auf die Viskosität des Schaums.

Zusammenfassend können die folgenden Parameter im Wesentlichen als bestimmend für die rheologischen Eigenschaften von Schäumen angesehen werden [4]:

- Gasanteil im Schaum
- Blasengrößenverteilung
- Viskosität und Fließverhalten der dispersen Phase
- Viskosität und Fließverhalten der kontinuierlichen Phase
- Grenzflächenspannung bzw. Grenzfilmeigenschaften
- Druck
- Strukturveränderungen des Schaums durch äußere Einflüsse

3 Einflüsse auf die Eigenschaften von Zementleimen

Von entscheidender Bedeutung für die Herstellung zementgebundener Schäume sind die Eigenschaften der aufzuschäumenden Zementleime. Daher beschreibt dieses Kapitel Wirkung und Wirkungsweise verschiedener Rezepturparameter und Ausgangsstoffe für Zementleime. So ist es möglich, die Leimeigenschaften gezielt auf die Erfordernisse der Schaumherstellung abzustimmen. Im Mittelpunkt stehen dabei das Fließ- und Verformungsverhalten sowie die Stabilität der Zementleime.

3.1 w/z-Wert, Porenraum und Packungsdichte

Zementleime weisen in Abhängigkeit von der Art und Menge des verwendeten Zements, des Wassers sowie ggf. weiterer Zugabestoffe unterschiedliche rheologische Eigenschaften auf. In der klassischen Betontechnologie wird angenommen, dass die Steifigkeit des Zementleims vor allem von dem Verhältnis der Wassermenge zur Zementmenge (w/z-Wert) bestimmt wird. Darüber hinaus spielt noch die Mahlfeinheit des Zements und ggf. die Korngrößenverteilung und Kornform der weiteren Zusatzstoffe eine entscheidende Rolle. Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass bei größerer Feststoffoberfläche (größere Feststoffmenge, feinere Feststoffe) ein erhöhter Wasserbedarf zu ihrer Benetzung erforderlich ist. Weiterhin nimmt man an, dass bei Wahl einer idealen Korngrößenverteilung über alle Feststoffe (z. B. Fuller-Sieblinie) eine ideale, größte Packungsdichte der Feststoffe erreicht wird. Dieses führt zu einem minimalen Zwickelvolumen zwischen den Partikeln und somit zu einem geringen Wasseranspruch des Feststoffgemischs. Dieses stark vereinfachte Modell bildet die Realität nur sehr unzureichend ab. Weitere Einflussfaktoren liegen z. B. in den Oberflächenbeschaffenheiten, der Saugfähigkeit, vor allem aber auch in den chemischen Eigenschaften und Grenzflächeneigenschaften der Feststoffe sowie in den Wechselwirkungen der Stoffe und Partikel untereinander [9, 44, 54].

Die neueren Entwicklungen im Bereich der Sonderbetone (z.B. Selbstverdichtende Betone) erfordern eine genauere Einstellung des Wassergehalts. Hier spielt der Wassergehalt auch für die Stabilität der Suspension eine wesentliche Rolle. Er ist so zu wählen, dass einerseits eine vollständige Benetzung aller Feststoffoberflächen möglich ist, andererseits sollte nicht mehr Wasser in der Suspension sein als durch Adhäsions- und Kapillarkräfte an den Feststoffoberflächen und in den Zwickeln gehalten werden kann. Zu viel Wasser führt zu einer Aufweitung des Korngerüsts, d.h. zu einer Vergrößerung des mittleren Abstandes der Feststoffpartikel. Wird der Abstand zwischen den Feststoffpartikeln zu groß, setzt die in Abschnitt 3.2.1 beschriebene Kapillarkohäsion aus, was die Stabilität der Suspension vermindert und zu Entmischungserscheinungen wie Blutwasser an der Oberfläche führt [86]. Ist zu wenig Wasser vorhanden, können nicht alle Partikeloberflächen hinreichend benetzt werden. Das führt zu einer Erhöhung der inneren Reibungskräfte zwischen den Partikeln und erhöht daher die Viskosität des Leims [76]. In diesem Fall ist eher von einem feuchten feinen Kornhaufwerk zu sprechen als von einer Suspension. Den optimalen Wassergehalt, bei dem alle Zwickel gefüllt sind und die Reibung zwischen den Feststoffpartikeln so weit herabgesetzt wird, dass sich unter geringer Verdichtungsarbeit eine große Packungsdichte einstellt bezeichnet Puntke [86] als Sättigungspunkt des Kornhaufwerks. Andere Ansätze zur Bestimmung feststoffspezifischer Wasseransprüche finden sich z.B. in [81, 54].

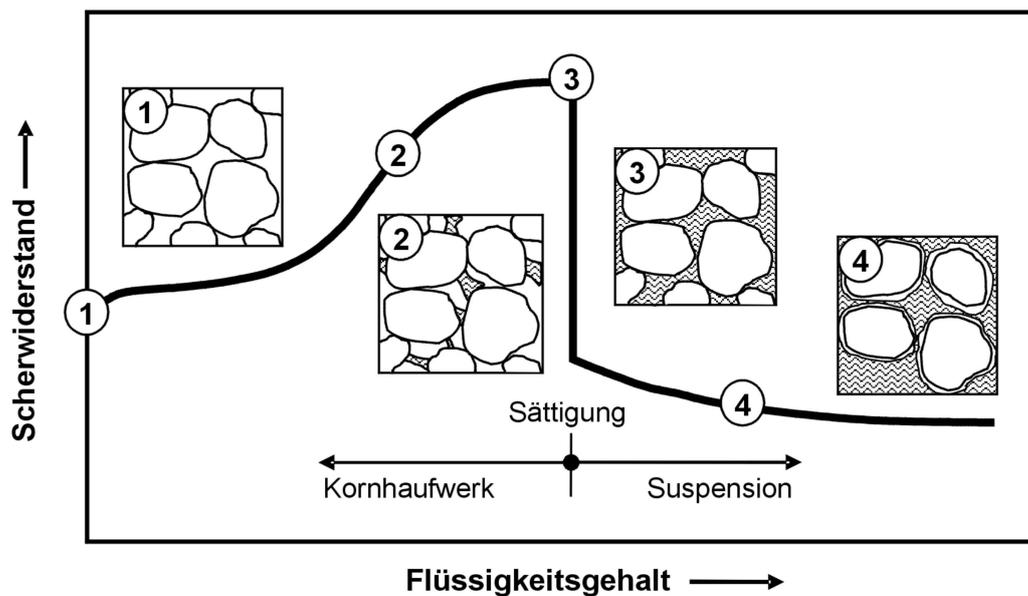


Abbildung 3.1: Einfluss des Wassergehalts auf den Scherwiderstand von Kornhaufwerken bzw. Suspensionen, nach [99]

Abbildung 3.1 verdeutlicht den Einfluss des Wassergehalts auf den Scherwiderstand von Kornhaufwerken und Suspensionen. Der Scherwiderstand seinerseits wirkt sich auf die Fließfähigkeit und zwar sowohl auf die Viskosität als auch auf die Fließgrenze derart aus, dass mit zunehmendem Scherwiderstand Viskosität und Fließgrenze steigen.

3.2 Stoffliche Einflüsse

3.2.1 Feststoffe allgemein

Feststoffe gehen über zahlreiche unterschiedliche Kräfte Wechselwirkungen miteinander ein. Wichtige Materialeigenschaften sind dabei die Korngrößen sowie Oberflächeneigenschaften und -ladungen. Eine detaillierte Zusammenstellung der unterschiedlichen Kräfte wird z.B. bei Freimann [37] und Keck [63] gegeben. Im Folgenden werden nur die wichtigsten auftretenden Kräfte kurz dargestellt.

Interpartikulare Kräfte

Bei Partikeln in der Größenordnung von 1 nm bis ca. 10 μm spricht man von kolloidalen Partikeln. Zwischen diesen haben interpartikuläre Kräfte eine besondere Bedeutung, da sie die Massenkräfte z. T. deutlich übersteigen [75, 109]. Zwischen diesen kolloidalen Partikeln wirken auf Grund von polaren oder polarisierbaren Molekülen *van der Waalsche* Anziehungskräfte sowie wegen ebenfalls oft vorhandenen freien elektrischen Ladungen an den Partikeloberflächen auch elektrostatische Kräfte.

Die van der Waals Kräfte sind relativ gering und nehmen mit der sechsten Potenz des Partikelabstandes (r^6) ab. Elektrostatische Kräfte sind proportional zu der Ladung der Partikel. Sie wirken bei gleichen Ladungen abstoßend und bei ungleichen Ladungen anziehend. Elektrostatische Kräfte nehmen mit dem Quadrat des Partikelabstandes (r^2) ab.

In wässrigen Suspensionen können darüber hinaus Ionen an den Partikeloberflächen angelagert werden, die durch Ausbildung von Doppelschichten die elektrostatisch abstoßenden Kräfte z.T. noch verstärken. Je nach Ladungsart ist auch eine Adsorption von Wassermolekülen möglich, wodurch sich eine Wasserhülle um die Partikel bildet, die die unmittelbare Annäherung zweier Partikel behindert.

Wegen der sehr unterschiedlichen Wirkradien der verschiedenen interpartikularen Kräfte ergibt sich bei ihrer Überlagerung eine Resultierende, die in Abhängigkeit von dem Teilchenabstand sowohl positive als auch negative Werte annehmen kann (Abbildung 3.2).

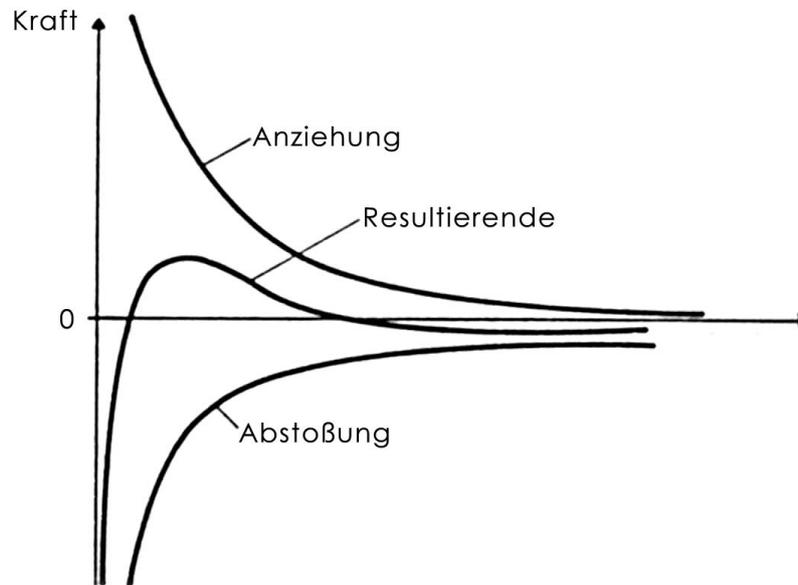


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Kräfte zwischen zwei kolloidalen Partikeln in Abhängigkeit vom Partikelabstand, nach [9]

Vorzeichen und Größe der resultierenden Kraft haben einen unmittelbaren Einfluss auf Viskosität und Fließgrenze einer Feinstoffsuspension, da sie über die Neigung zum Dispergieren oder Agglomerieren bzw. Flockungserscheinungen der Feinstoffe entscheidet. Während eine dispergierende Wirkung Fließgrenze und Viskosität einer Suspension verringern, werden diese durch Agglomerationen und Flockenstrukturen erhöht. Kommt es z.B. durch die Einwirkung von Scherkräften zu einer Verschiebung der Feststoffpartikel und damit verbunden zu einer Veränderung des Partikelabstandes neigen diese Agglomerationen und Flockenstrukturen jedoch zum Zerfall. Dieses führt zu einer deutlichen Verflüssigung. Dieser Effekt der Verflüssigung unter Scherbeanspruchung durch Abbau von Feststoffstrukturen ist ein Grund für das strukturviskose Verhalten von Zementleimen mit einer z.T. ausgeprägten Fließgrenze.

Kapillare Kräfte

Sind die Teilchenoberflächen wegen geringer Wassergehalte nur teilweise benetzt, so dass Wasser nur in den Zwickelbereichen von Berührungspunkten der

Körner vorliegt, kann es zu Kohäsionskräften kommen, die die Körner zusammenhalten [37]. Diese werden, wie in Abbildung 3.3 dargestellt, durch Kapillarkwirkung des Wassers hervorgerufen.

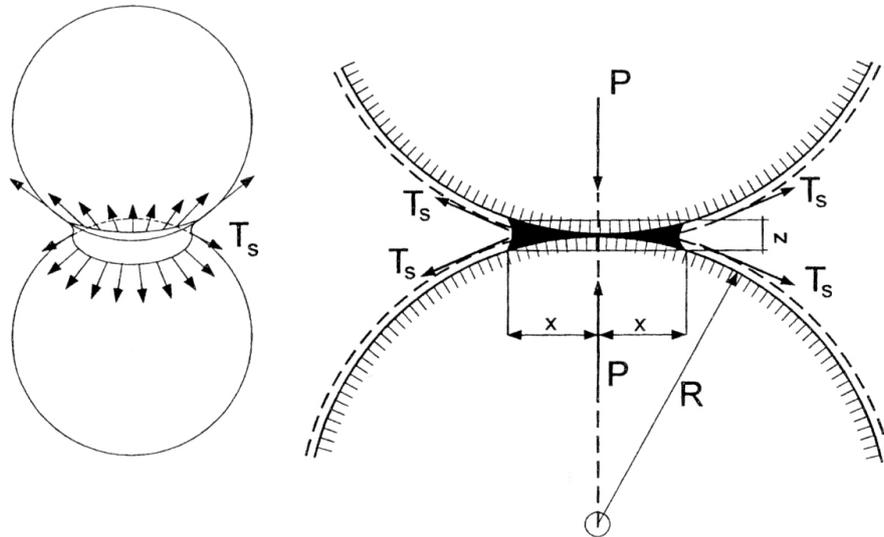


Abbildung 3.3: Kapillarkohäsion zwischen zwei Partikeln, aus [37]

Kapillarkräfte treten wegen der verwendeten Wassergehalte nur bei steifen Mörteln und Betonen auf. Zementleime haben im Allgemeinen so hohe Wassergehalte, dass Kapillarkräfte bei diesen nicht oder nur in vernachlässigbarem Umfang auftreten.

Mechanische Kräfte

Zu den mechanischen Kräften zählen in erster Linie die Gravitations- und Reibungskräfte, wobei letztere in Festkörperreibung und Flüssigkeitsreibung unterteilt werden.

Die Festkörperreibung oder innere Reibung spielt vor allem in steifen Betonen eine Rolle, da sie einen direkten Kontakt der Körner voraussetzt. Sie nimmt mit steigender Korngröße zu. Festkörperreibung tritt immer dann auf, wenn auf Grund von Scherbeanspruchungen dicht gelagerte Körner gegeneinander versetzt werden. Wegen der wesentlich geringeren inneren Reibung an feinen Partikeln bilden sich bei weichen Betonen mit höherem Leimanteil die Scherflächen in der Regel im Leim aus [37]. Die Festkörperreibung bei reinen Zementleimen mit ausschließlich feinen Partikeln ist relativ gering. Der Festkörperreibung kann auch die Reibung zwischen Beton und Wandungen, z. B. in Rohren,

Schalungen etc., zugeordnet werden. Hier bildet sich allerdings in der Regel ein „Gleitfilm“ aus Zementleim entlang der Wandungen aus, durch den der Beton mit geringeren Reibungswiderständen bewegt werden kann.

Flüssigkeitsreibung entsteht beim Umfließen von Feststoffen durch den Reibungswiderstand an deren Oberflächen. Sie ist abhängig von dem Volumenbruch der Feststoffe, der Partikelgröße und -oberflächenbeschaffenheit. Die Flüssigkeitsreibung steigt mit Zunahme der umflossenen Feststoffoberfläche. Sie ist eine entscheidende Größe für die rheologischen Eigenschaften und hier speziell für die Viskosität von Zementleimen, Mörteln und Betonen, weil sie die Wechselwirkungen zwischen fester und flüssiger Phase maßgeblich beeinflusst. Eine stärkere Flüssigkeitsreibung führt zu einer höheren Viskosität. Die mathematische Beschreibung der Flüssigkeitsreibung für ideale, kugelförmige Teilchen entspricht dem schon erläuterten *Stokeschen* Gesetz (Gleichung 2.6), wobei in diesem Fall v für die Fließgeschwindigkeit des Fluids steht.

Die Gravitationskraft hat keinen unmittelbaren Einfluss auf die Fließeigenschaften von Zementleimen. Ihre Einwirkung auf die Leime kann jedoch einerseits dazu führen, dass eine vorhandene Fließgrenze allein unter dem Eigengewicht des Leims überschritten wird und so eine Fließfähigkeit auftritt, die unter anderen geometrischen Randbedingungen (verringerte Leimhöhe) nicht gegeben ist. Andererseits ist die Gravitationskraft ausschlaggebend für eventuelle Entmischungserscheinungen wie Sedimentation und Wasserabsonderung. Somit beeinflusst sie die Stabilität der Leime im Sinne von Homogenität, die eine Voraussetzung für ein gleichmäßiges Fließverhalten der Leime ist.

3.2.2 Zement

Die Einflüsse unterschiedlicher Zementarten im Hinblick auf die granulometrischen Eigenschaften der Zemente wurden von vom Berg [9] zusammengestellt, untersucht und beschrieben. Dabei zeigte sich, dass ein erheblicher zahlenmäßiger Anteil der Zementkörner in den Bereich der kolloidalen Partikel fällt. Daher werden die rheologischen Eigenschaften von Zementleimen wesentlich von den interpartikularen Kräften zwischen den feinsten Zementkörnern beeinflusst. In erster Linie sind hier die *van der Waalschen* Anziehungskräfte zu nennen. Durch den Mahlprozess werden Zementkörner an ihrer Oberfläche überwiegend positiv geladen [14]. Dadurch treten zusätzlich elektrostatische Abstoßungskräfte zwischen den Körnern auf. Unmittelbar nach der Zugabe von

Wasser kommt es nach [13] durch die Anfangshydrolyse von Silikaten und Aluminaten zu einer negativen Oberflächenladung. Diese wird durch die ebenfalls schnell einsetzende Adsorption von Ca^{2+} -Ionen oder bei der Erstreaktion von Zement und Wasser entstandenen, positiv geladenen Ettringitteilchen [102] wieder ausgeglichen. Durch die zweifach positive Ladung der Ca^{2+} -Ionen können diese gleichzeitig von zwei benachbarten Zementkörnern adsorbiert werden und als Bindeglied zwischen diesen fungieren. Diese Vorgänge führen zu Agglomerationserscheinungen (vgl. Abbildung 3.4), die, wie in Abschnitt 3.2.1 dargestellt, strukturviskoses Verhalten durch Ausbildung einer Fließgrenze hervorrufen.

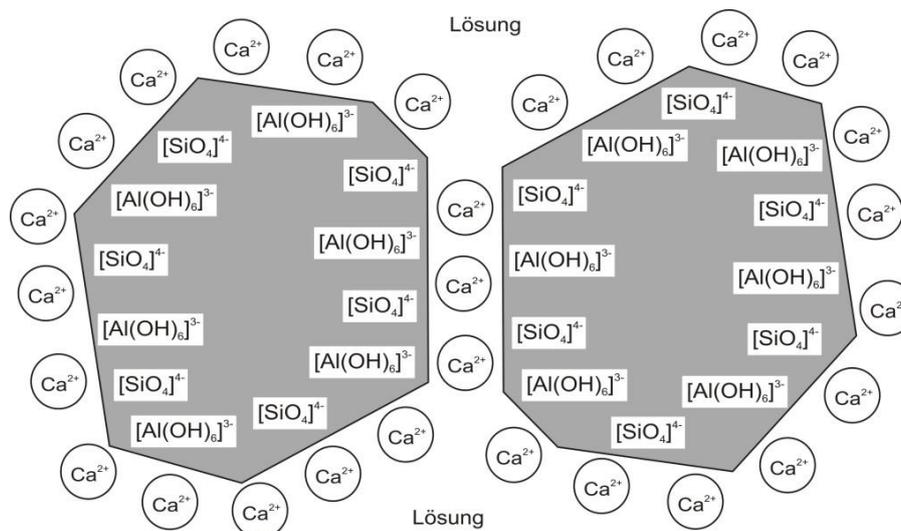


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung der Agglomeration von Zementpartikeln durch die Adsorption von Ca^{2+} -Ionen aus der Lösung, aus [13]

Ein weiterer durch die Oberflächenladungen des Zements hervorgerufener Effekt ist die Anlagerung von Wassermolekülen an den Partikeloberflächen [9]. Diese bilden einen Wasserfilm und bewirken dadurch zum einen einen „Gleit-effekt“ und zum anderen wird eine sehr nahe Annäherung der Partikel behindert (sterische Abstoßung).

3.2.3 Flugasche

Steinkohlenflugaschen wirken vielfältig auf die rheologischen Eigenschaften von Zementleimen, Mörteln und Betonen. Umfangreiche Untersuchungen dazu hat u.a. Freimann [37] durchgeführt. Bei der Verbrennung von Steinkohle wird ein erheblicher Teil der Verbrennungsrückstände wegen der hohen Feuerraumtemperaturen aufgeschmolzen. Bei sinkender Temperatur im Abgasstrom erstarren sie zu kugelförmigen, glasigen Partikeln, die durch Elektrofilter aus den

Abgasen abgeschieden werden. Auf Grund dieses Entstehungsprozesses weisen Flugaschen eine sehr runde Form und glatte Oberfläche auf [112]. Die Partikelgrößen bewegen sich in ähnlichen Größenordnungen wie die des Zements. Da Flugaschen keinen Mahlvorgängen unterworfen werden, haben sie in der Regel geringere Oberflächenladungen als z.B. Zemente. Daher beruht ihre rheologische Wirkung primär auf geometrischen Effekten. Zum einen kann eine Flugasche, die hinsichtlich der Partikelgröße gut auf den verwendeten Zement abgestimmt ist, zu einer Verbesserung der Sieblinie führen und so die Packungsdichte der Feststoffe optimieren (Füllereffekt) und den von den Zwickeln abhängigen Wasseranspruch des Kornhaufwerks reduzieren. Zum anderen begünstigt die sehr runde Form der Partikel durch eine Art Kugellagereffekt das aneinander Vorbeigleiten der Feststoffe, was zu einer Reduzierung der Scherwiderstände und somit zu einer Verflüssigung führt. Bei Flugaschen mit nennenswerten Mengen organischer Bestandteile können diese allerdings auch zur Erhöhung des Wasseranspruchs führen.

Durch die puzzolanische Wirkung der Flugaschen können diese zur Festigkeitsentwicklung beitragen. Daher kann in begrenztem Umfang Zement durch Flugasche ersetzt werden. Dabei wird sowohl der Wasseranspruch des Feststoffgemischs verändert als auch das chemische Zusammenspiel der Stoffe. Die festigkeitssteigernde Reaktion der Flugaschen startet verzögert, da sie auf das Vorhandensein von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aus der Zementreaktion angewiesen ist. Außerdem läuft die Reaktion über einen längeren Zeitraum ab, was die Leimeigenschaften anfangs weniger beeinflusst. Wegen des geringeren Zementgehalts nach teilweisem Ersatz durch Flugasche erfolgen die Hydratationsreaktionen insgesamt schwächer [54], wodurch auch die rheologischen Einflüsse der chemischen Reaktionen (z.B. durch Ionenfreisetzung) geringer sind.

3.2.4 Gesteinsmehle

Grundsätzlich kann jedes Gestein durch entsprechende Mahlprozesse zu Gesteinsmehlen verarbeitet werden. Aus wirtschaftlichen Gründen werden in der Betontechnologie jedoch vorwiegend Kalksteinmehle oder Quarzmehle als Zusatzstoffe verwendet. Daher wird im Weiteren nur auf diese eingegangen.

Kalksteinmehl

Kalksteinmehle sind in unterschiedlichen Korngrößenverteilungen auf dem Markt erhältlich. Je nach Produktionsprozess unterliegen sie z.T. erheblichen Schwankungen. Aus wirtschaftlichen Gründen werden in der Regel Kalksteinmehle mit Korngrößen in ähnlicher Größenordnung wie Zemente genutzt, tendenziell eher etwas geringer um eine Verbesserung der Sieblinie zu erreichen. Sie verbessern durch ihre Füllerwirkung und ein hohes Wasserrückhaltevermögen den Zusammenhalt des Leims, d.h. sie erhöhen die Viskosität. Der Wasseranspruch von Kalksteinmehlen bewegt sich in ähnlicher Größenordnung wie der von Zementen und ist größer als bei Flugaschen, was auf eine sehr rauhe, unregelmäßige Oberfläche zurückzuführen ist. Diese bedingt auch eine verstärkte Verzahnung der Partikel untereinander, was die Ausbildung von Scherflächen erschwert und so die Viskosität und Fließgrenze erhöht.

Bei höheren Kalksteinmehlgehalten wurden negative Einflüsse auf die Wirksamkeit von Luftporenbildnern beobachtet [73], was allerdings auch mit der Veränderung der Korngrößenverteilung des Feststoffgemisches zusammenhängen kann. Da Kalksteinmehle oft aufgemahlen werden, ist mit ausgeprägten Oberflächenladungen zu rechnen, die wie beim Zement zu einer Flockungsneigung führen können und daher ebenfalls die in Abschnitt 3.2.1 dargestellten Einflüsse auf die Ausprägung einer Fließgrenze haben.

Quarzmehl

Nach [100] weisen Quarzmehle ein negatives Oberflächenpotential auf, weshalb sie auf Grund von elektrostatischen, abstoßenden Kräften in reiner, wässriger Lösung ideal dispergieren und daher eine maximale Fließfähigkeit besitzen. Diese Fließfähigkeit wird jedoch radikal vermindert, wenn zu der Quarzmehlsuspension positive Ionen (z.B. durch Calcium-Ionen) zugegeben werden. Diese sind in der Lage, wie in Abbildung 3.5 dargestellt und entsprechend auch schon für den Zement und das Kalksteinmehl beschrieben, zwischen den Quarzmehlparkeln Brücken zu bilden und so eine Agglomeratbildung hervorzurufen [102]. Da in Zementsuspensionen stets von dem Vorliegen positiver Ionen ausgegangen werden muss, ist auch hier eine Agglomeratbildung wahrscheinlich. In [102] wird jedoch gezeigt, dass diese Agglomeratbildung durch Betonverflüssiger oder Fließmittel (vgl. Abschnitt 3.2.6) verhindert bzw. rückgängig gemacht werden kann (Abbildung 3.6).

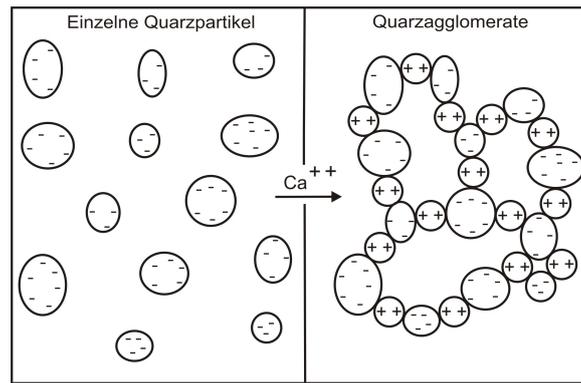


Abbildung 3.5: Modell für die Agglomeration von Quarzpartikeln in einer wässrigen Suspension durch Calciumionen, aus [102]

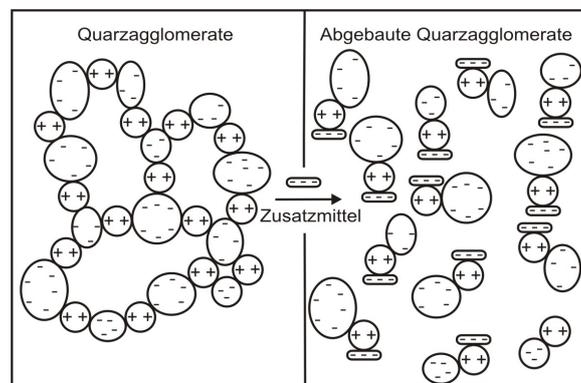


Abbildung 3.6: Modell für den Abbau der Quarzagglomerate in wässriger Lösung durch verflüssigende Zusatzmittel, aus [102]

Hinsichtlich der Fließeigenschaften von Zementleimen sind von Quarzmehlen ähnliche Einflüsse zu erwarten wie von Kalksteinmehlen.

3.2.5 Silikastäube

Silikastaub-Partikel haben eine runde Kornform und sehr kleine Durchmesser (ca. $0,1 \mu\text{m}$), die im Mittel um den Faktor 100 kleiner sind als die Durchmesser von Zementkörnern [112]. Daher wirken Silikastäube als „Füller“ zwischen den anderen Feinstoffen [98], was das Zwickelvolumen deutlich reduziert. Aus der Feinheit ergibt sich auch eine große Oberfläche und ein daraus resultierender hoher Wasseranspruch. Solange mit der Zugabe von Silicastäuben eine Verdrängung von Zwickelwasser einhergeht, macht sich dieser hohe Wasseranspruch nur bedingt bemerkbar. Bei einer Überdosierung der Silicastäube steigt der Wasseranspruch jedoch stark an. Silikastäube reduzieren das Bluten und Entmischungerscheinungen [87], indem sie (vgl. Abbildung 3.7)

- an ihren großen Oberflächen Wasser physikalisch binden,
- durch die Bildung von Agglomeraten bzw. Flockenstrukturen freies Wasser einschließen,
- durch das Schließen von Zwickeln und die Verringerung der Partikelabstände Blutwasserkanäle unterbrechen.

Gleichzeitig wird durch diese Effekte der Zusammenhalt des Betons verstärkt, was zu einem zäheren, klebrigeren Erscheinen führt. Auf Grund dieser Eigenschaften werden Silikastäube auch als Wirkstoff für Stabilisierer verwendet (vgl. Kapitel 3.2.8).

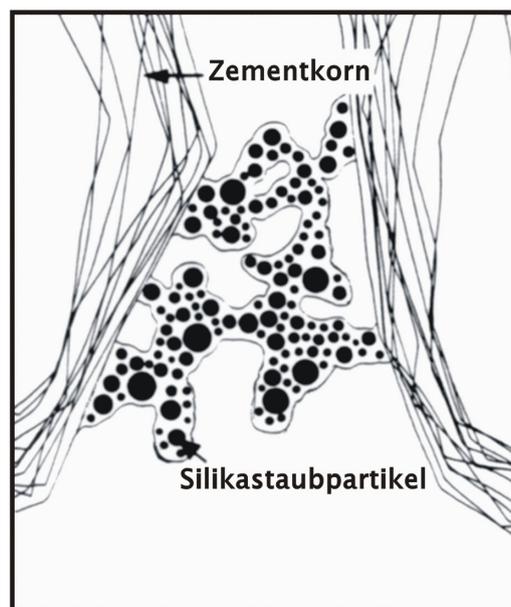


Abbildung 3.7: Füllerwirkung und Wasserrückhaltevermögen von Silikastäuben, nach [87]

Wegen der hohen Feinheit neigen Silikastäube zu Agglomerationen. Um eine homogene Verteilung während des Mischprozesses zu ermöglichen, werden sie daher vielfach in Form von Slurrys, teilweise mit dispergierenden Zusatzmitteln, zugegeben. Bei trockener Zugabe sollten Silikastäube mit gröberen Feststoffen vorgemischt werden, um die Agglomerationen aufzubrechen.

Silikastäube haben eine starke puzzolanische Wirkung [87], die jedoch keine wesentlichen Auswirkungen auf die Frischbetoneigenschaften hat.

3.2.6 Betonverflüssiger und Fließmittel

Betonverflüssiger und Fließmittel sind zwei Zusatzmittelgruppen, die in der Btontechnologie mittlerweile oft zur Anwendung kommen. Sie unterscheiden sich vor allem in der Stärke der verflüssigenden Wirkung. Ziel dieser Zusatzmittel ist eine Reduzierung des Wasseranspruchs. Dies kann entweder zu einer Minderung des w/z-Werts genutzt werden oder für eine weichere Konsistenz, also zur Verflüssigung. Ihre Wirkung basiert vor allem auf der besseren Dispergierung der Feinstoffe und der Freisetzung von durch Flockungen gebundenem Wasser. Insgesamt können sieben potentielle Wirkmechanismen unterschieden werden, die z.T. parallel bei einem Zusatzmittel wirken [1]:

1. Hervorrufen elektrostatischer Abstoßungskräfte zwischen den feinen Partikeln
2. Verminderung der Reibung zwischen den Partikeln durch Ausbildung von „Gleitfilmen“ um die Partikel
3. Auflösung von Flockungserscheinungen der Feststoffpartikel durch Ausgleich von Oberflächenladungen und Freisetzung des durch die Flockungen gebundenen Wassers
4. Verzögern der Zementhydratation, wodurch das sonst durch die Hydratation gebundene Wasser länger zur Verflüssigung zur Verfügung steht
5. Veränderungen in der Morphologie der Hydratationsprodukte
6. Hervorrufen sterischer Hinderungen bei Annäherung von Partikeln
7. Verringerung der Oberflächenspannung des Wassers

Die Grundstoffe sowohl für Betonverflüssiger als auch für Fließmittel unterscheiden sich nicht notwendigerweise. Es gibt unterschiedliche Wirkstoffe, die sich grob in zwei Gruppen aufteilen lassen, Wirkstoffe auf Sulfonat-Basis oder auf Polyacrylat- bzw. Polycarboxylat-Basis. Beide Gruppen haben einen grundlegend verschiedenen Molekülaufbau und daher unterschiedliche Wirkmechanismen.

Zu den Fließmitteln auf Sulfonatbasis gehören vor allem:

- Ligninsulfonate

- Melaminsulfonate
- Naphtalinsulfonate

Ligninsulfonate

Ligninsulfonate haben eine relativ geringe verflüssigende Wirkung. Sie werden daher nur für Betonverflüssiger und nicht für Fließmittel eingesetzt. Neben ihrer verflüssigenden Wirkung haben sie auch aufschäumende und, durch ihren relativ hohen Gehalt an Zucker und organischen Säuren, stark verzögernde Wirkungen [1]. Diese werden teilweise durch Zugabe von Entschäumern bzw. Beschleunigern ausgeglichen. Da Ligninsulfonate Naturprodukte sind, können ihre Strukturelemente und Zusammensetzungen stark variieren. Dementsprechend streuen auch die mittleren Molmassen stark und liegen zwischen 500 und 50.000 g/mol [13]. Die Anzahl der polaren Gruppen bezogen auf die Molmasse ist z.T. relativ gering.

Naphtalinsulfonate

Naphtalinsulfonate werden meist als Polynaphtalinsulfonate verwendet. Sie entstehen durch die Kondensation von Naphtalinsulfonaten mit Formaldehyd. Sie weisen einen geringen Polymerisationsgrad auf. Die ganzen Moleküle bestehen nur aus ca. 10 Monomeren und haben daher nur mittlere Molmassen von ca. 1.500 g/mol. Sie besitzen eine Vielzahl von polaren Regionen, die gleichmäßig über das Molekül verteilt sind und daher einer Micellenbildung entgegenwirken. Als Fließmittel werden meist die Na- und Ca-Salze der Polynaphtalinsulfonate verwendet [13].

Mit den Polynaphtalinsulfonaten können deutlich höhere Wasserreduzierungen bzw. verflüssigende Effekte erzielt werden als mit Ligninsulfonaten. Sie können in höheren Dosierungen eingesetzt werden, weil sie eine geringere verzögernde und aufschäumende Wirkung haben. Letzteres beruht darauf, dass die Moleküle keine hydrophoben Bereiche und daher nicht die Struktur schaubildender Tenside haben. Dennoch wird auch diesen Fließmitteln Entschäumer zugesetzt.

Melaminsulfonate

Auch Melaminsulfonate werden in Form von Polymelaminsulfonaten eingesetzt. Sie werden ähnlich hergestellt und haben vergleichbare Eigenschaften wie Poly-

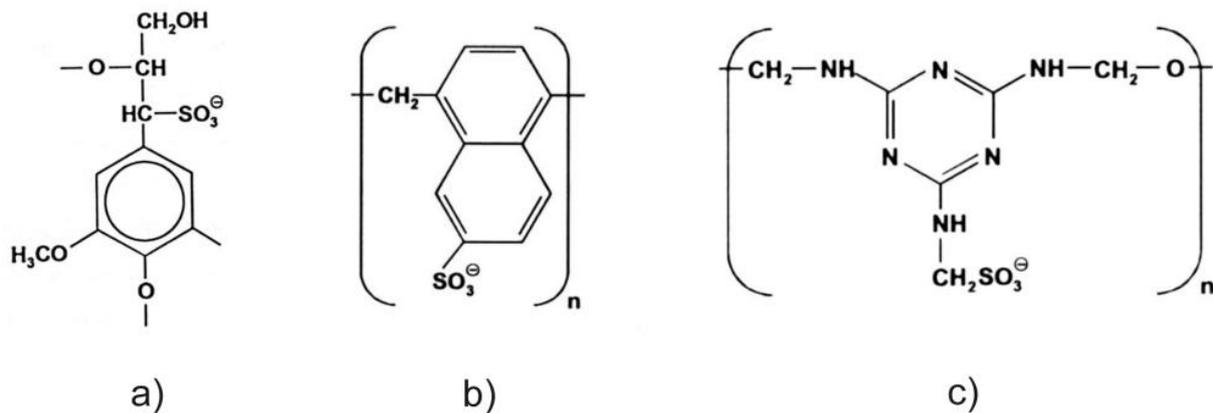


Abbildung 3.8: Beispiele für Strukturelemente von Lignin- (a), Polynaphthalin- (b) und Polymelaminsulfonaten (c), aus [13]

naphtalinsulfonate. Sie weisen jedoch einen deutlich höheren Polymerisationsgrad auf und haben daher eine höhere mittlere Molmasse von ca. 30.000 g/mol [13].

Die verflüssigende Wirkung aller Sulfonate beruht auf der Veränderung der Oberflächenspannung des Wassers und wesentlich auf elektrostatischer Abstoßung bzw. dem Abbau elektrostatischer Anziehungskräfte. Sie werden an den Oberflächen der Zementpartikel adsorbiert und verändern so deren Oberflächenladung. Der Adsorptionsprozess und die anderen chemischen Prozesse (Anfangshydrolyse, einsetzende Hydratation) beeinflussen sich allerdings wechselseitig. Daher ist die Wirksamkeit der Verflüssiger/Fließmittel sowohl vom Zeitpunkt der Zugabe als auch von der chemischen Zusammensetzung der verwendeten Zemente und sonstigen Zusatzmittel/-stoffe abhängig. Verschiedene Untersuchungen [46, 22, 110, 62] haben daher z.T. zu unterschiedlichen Phänomenen und Deutungen geführt. Nach [1] haben folgende Zementeigenschaften einen wesentlichen Einfluss auf die Wirksamkeit der Fließmittel:

- C₃A-Gehalt
- Morphologie des C₃A
- pH-Wert/Alkaligehalt
- Calciumsulfate im Zement
- Gleichgewicht zwischen SO₄²⁻-Ionen und C₃A

Darüber hinaus scheint die Zugabe von Sulfonaten zu einer Senkung der Ca^{2+} -Konzentration durch Salzbildung mit den Sulfonsäuregruppen der Fließmittel zu führen. Dadurch wird auch die Adsorption von Ca^{2+} -Ionen an den Zementoberflächen (vgl. Abbildung 3.4) vermindert. Die Adsorption der Betonverflüssiger-/ Fließmittelmoleküle aus Sulfonaten erfolgt relativ schnell und vollständig. Daher liegen bereits nach kurzer Zeit kaum noch freie Moleküle in der Lösung vor, die sich an durch Hydratation neu gebildete Flächen anlagern können. Aus diesem Grund lässt die Wirksamkeit dieser Mittel bereits nach ca. 30 Minuten deutlich nach [83]. In [3] wurde auf Grundlage von Messungen der Adsorptionsrate und Zetapotenzialmessungen bei unterschiedlichen Fließmitteln ein Einfluss der Molmassen auf die Wirksamkeit untersucht. Dabei zeigten sich für das verwendete Fließmittel bei mittleren Molmassen besonders günstige Werte. Dies deutet darauf hin, dass ein ausgewogenes Verhältnis zwischen der Adsorptionsgeschwindigkeit (abhängig von der Molekülgröße) und der Anzahl der polaren Gruppen vorliegen sollte.

Polycarboxylate

Die neuste Entwicklung im Bereich der Fließmittel sind Polyacrylate bzw. Polycarboxylate. Ihre chemische Struktur kann vielfältig variiert werden, da sie aus mehreren Komponenten copolymerisiert werden. Es handelt sich um anionische Polymere, die durch Polymerisation aus ungesättigten Carbonsäuren (Acrylsäure, Methacrylsäure, Maleinsäure) entstehen. Durch ganze oder teilweise Veresterung der Carboxylgruppen entsteht eine verzweigte Struktur mit einer Haupt- und vielen aliphatischen Seitenketten [44].

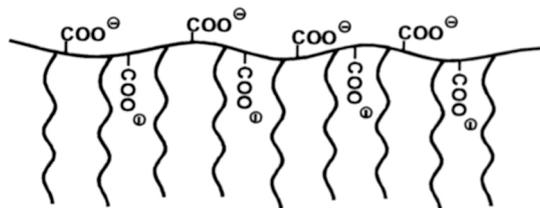


Abbildung 3.9: Schematischer Aufbau der Polycarboxylate aus einer langen Hauptkette mit teilweise unveresterten Carboxylgruppen und vielen Seitenketten, aus [13]

Für den Aufbau der Seitenketten kommen unterschiedliche Verbindungen in Frage, u.a. Alkohole, Diöle und Hydroxycarbonsäuren. Heute werden in der Regel Polycarboxylatether verwendet, bei denen die Seitenketten aus Polyethern (=Polyethylenoxid) bestehen. Der Aufbau typischer Polycarboxylatether ist in

Abbildung 3.10 exemplarisch dargestellt. Dabei kann im Herstellungsprozess sowohl die Länge der Hauptketten zwischen üblicherweise 50 bis 300 Monomeren variiert werden als auch die Länge der Nebenketten zwischen ca. 5 bis 50 Ethylenoxidgruppen. Daher variiert die mittlere Molmasse nach [13] zwischen 10.000 und 100.000 g/mol.

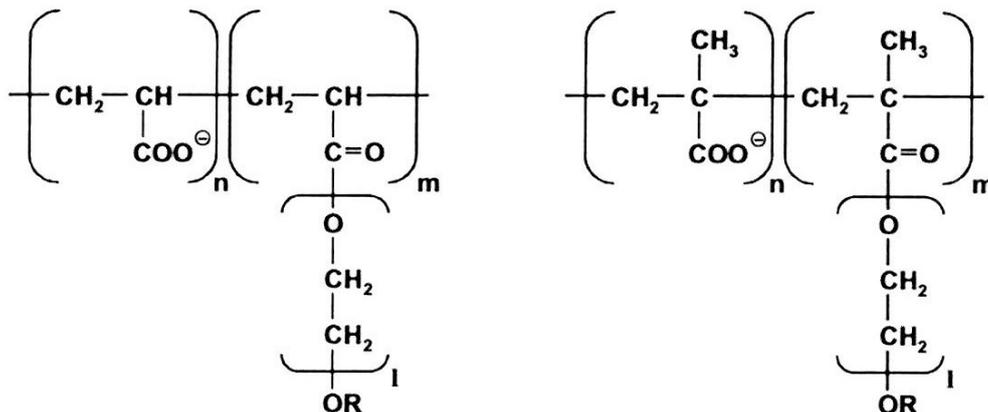


Abbildung 3.10: Aufbau von Polycarboxylatethern auf der Basis von Acrylsäure (links) und Methacrylsäure (rechts), aus [13]

Die räumliche Ausdehnung der Polycarboxylate hängt von den Kettenlängen (Polymerisationsgrad) und von den Umgebungsbedingungen ab. In einer wässrigen Lösung mit pH -Wert > 7 kommt es zu einer elektrostatischen Abstoßung der Carboxylgruppen, was zu einer weitgehend gestreckten Form wie in Abbildung 3.9 führt. Aus den chemischen Gegebenheiten lassen sich in Abhängigkeit vom Polymerisationsgrad grob die Längen der Haupt- und Nebenketten zu 13-76 nm bzw. 2-19 nm [13] abschätzen. Diese räumliche Ausdehnung hat einen wesentlichen Einfluss auf die Adsorptionsgeschwindigkeit der Moleküle. Nach [83] kann bei geringerer Adsorptionsgeschwindigkeit von einer längeren Wirkungsdauer ausgegangen werden, da die Adsorption der Polycarboxylatmoleküle auch im Laufe der Hydratation anhält.

Die verflüssigende Wirkung der Polycarboxylate beruht ebenfalls auf ihrer Adsorption an den Oberflächen der Feststoffpartikel und insbesondere der Zementkörner. Diese erfolgt vmtl. durch die unveresterten Carboxylatgruppen [111]. Die Dispergierung der Partikel erfolgt bei Polycarboxylaten wesentlich durch sterische Hinderung auf Grund der langen Seitenketten. Diese haben hydrophile Eigenschaften, wodurch sie Wassermoleküle anlagern und so einen stabilen Wasserfilm um die Feststoffe bilden. Dadurch wird eine Annäherung der Partikel aneinander verhindert und die innere Reibung im Leim minimiert. Bei hohen

Dosierungen und besonders bei langen Seitenketten (große Moleküle) können Polycarboxylate ähnlich wie organische Stabilisierer (siehe 3.2.8) durch Anlagerung von Wassermolekülen und Knäuelbildung viskositätssteigernd wirken. In [130] wurde gezeigt, dass längere Seitenketten grundsätzlich zu einer höheren Fließfähigkeit, niedrigeren Viskosität und niedrigeren Fließgrenze führen. Eine zunehmende Länge der Hauptkette wirkt sich hingegen tendenziell negativ auf die Fließfähigkeit aus. Überlagert wird dieser Effekt allerdings durch das Adsorptionsverhalten der Moleküle, das gerade bei längeren Haupt- und kürzeren Nebenkettens deutlich besser ist. Die Wirkung eines Fließmittels ist von beiden Faktoren, dem Adsorptionsverhalten und der Ausprägung der sterischen Hinderung abhängig. Hier ist eine Optimierung der Produkte erforderlich. Eine grobe Gegenüberstellung von Strukturmerkmalen und Eigenschaften ist in Tabelle 3.1 wiedergegeben.

Tabelle 3.1: Strukturmerkmale und Eigenschaften von Polycarboxylaten, nach [48]

Eigenschaften	Strukturmerkmale		
	rel. Länge der Hauptkette	rel. Länge der Seitenketten	Ladungsdichte
gute Wirksamkeit	mittel	kurz	hoch
lange Verarbeitbarkeit	kürzer	mittel	niedrig
gute Frühfestigkeit	kurz	lang	mittel

Durch die chemische Zusammensetzung der Zemente kann die Wirksamkeit der Polycarboxylate wesentlich beeinflusst werden. Insbesondere bei hohen Alkalisulfatgehalten wurden in [131] schlechtere Ergebnisse beobachtet.

Über die sterische Hinderung hinaus findet auch eine elektrostatische Abstoßung statt. Diese wird, wie im Folgenden erläutert, durch zwei unterschiedliche Theorien erklärt.

Nach [106] kommt es wegen der negativ geladenen Carboxylgruppen an den Seitenketten bei flächiger Adsorption der Fließmittelmoleküle an den Teilchenoberflächen unmittelbar zu einer elektrostatischen Abstoßung (siehe Abbildung 3.11).

In [13] wird hingegen davon ausgegangen, dass sich in Folge der Fließmitteladsorption und der daraus resultierenden negativen Ladungen in der Umgebung der Feststoffe eine elektrochemische Doppelschicht (vgl. Abbildung 3.12) ausbildet, die dann durch elektrostatische Kräfte eine zusätzliche verflüssigende Wirkung bringt.

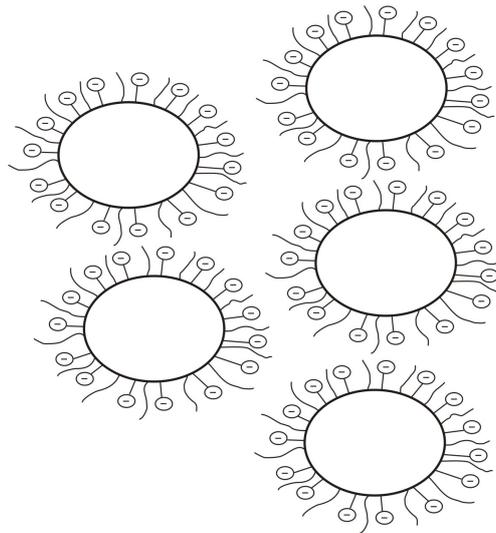


Abbildung 3.11: Schematische Darstellung der elektrosterischen Dispersion von Zementpartikeln, aus [106]

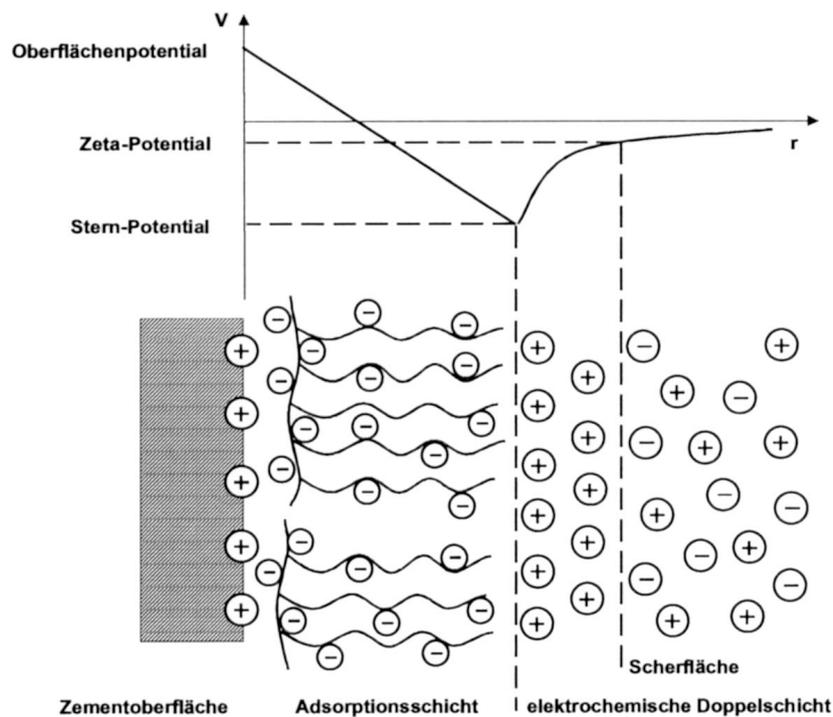


Abbildung 3.12: Schematische Darstellung der elektrochemischen Doppelschicht an der Oberfläche eines Zementpartikels mit einer Adsorptionsschicht von Zusatzmittelmolekülen, aus [13]

Die verflüssigende Wirkung aller Fließmitteltypen ist nur bei niedrigen Dosierungen von dieser direkt abhängig. Ab einem gewissen Sättigungspunkt, der von der individuellen Zement-Fließmittel-Kombination abhängt, führt eine Steigerung der Dosierung nicht mehr zu einer nennenswerten weiteren Verflüssigung. Stattdessen treten deutliche Entmischungen auf, die sich sowohl am Frischbeton als auch in Absetzversuchen an Zementleimen zeigen [1, 102, 54]. Darüber hinaus weisen alle Fließmittel besonders bei hohen Dosierungen verzögernde Wirkungen auf [112].

3.2.7 Luftporenbildner und Schaummittel

Luftporenbildner und Schaummittel basieren auf Wirkstoffen aus der Gruppe der grenzflächenaktiven Stoffe. Sie haben primär die Aufgabe, Luftporen in nennenswertem Umfang im Zementleim bzw. in der Matrix von Betonen zu etablieren. Der Lufteintrag kann in der herkömmlichen Betontechnologie im Wesentlichen durch zwei Verfahren erfolgen:

- Einbringen von Luftblasen in eine Leim-, Mörtel- oder Betonmischung durch den Mischprozess und Stabilisierung dieser Blasen unter Verwendung grenzflächenaktiver Stoffe
- separate Herstellung eines möglichst geschlossenzelligen Schaums aus einer wässrigen Tensid- oder Proteinlösung, der dann unter den Leim, Mörtel bzw. Beton gemischt wird und so ein großes, im besten Fall stabiles Porenvolumen hervorruft

Zum Stabilisieren der im Mischprozess entstandenen Luftporen werden in der Regel Luftporenbildner verwendet. Die Herstellung geschlossenzelliger Schäume, die separat hergestellt und dann dem Bindemittleim, Mörtel oder Beton zugegeben werden, erfolgt hingegen meist mit Hilfe von Schaummitteln. Trotz der unterschiedlichen Anwendungsverfahren sind beide Zusatzmittel bedingt austauschbar, da sie prinzipiell auf den gleichen Wirkstoffen basieren und daher die gleichen physikalisch-chemischen Wirkprinzipien nutzen (vgl. Kapitel 2.3). So können Schaummittel in geringerer Dosierungen auch direkt dem Leim oder Beton zugesetzt werden und ähnliche porenstabilisierende Effekte erzielen wie Luftporenbildner. Einflüsse auf die Wirksamkeit sowie die Größe und Anzahl der Luftporen ergeben sich aus der Dosierung sowie der spezifischen Formulierung der Wirkstoffe in den unterschiedlichen Produkten.

Neben bzw. durch die erhöhten Luftgehalte bei Anwendung von Luftporenbildnern und Schaummitteln ergibt sich in der Regel eine verflüssigende Wirkung, vor allem auf Beton. Dies beruht auf unterschiedlichen Effekten:

- Durch den Lufteintrag erhöht sich das Leimvolumen und somit der Leimanteil am Gesamtvolumen
- Durch ihre kugelige Form bewirken die Luftporen eine Art Kugellagereffekt, der zu einer Reduzierung des Scherwiderstandes im Beton führt [2]
- Die grenzflächenaktive Wirkung der Luftporenbildner und Schaummittel entfaltet sich in geringerem Umfang ähnlich wie bei Betonverflüssigern und Fließmitteln auch an den Grenzflächen zwischen Feststoffen und flüssiger Phase
- Insbesondere bei der Verwendung separat hergestellter Schäume sowie bei besonders hohen Dosierungen der flüssigen Zusatzmittel ist der Einfluss des Flüssigkeitsanteils auf die rheologischen Eigenschaften des Betons zu berücksichtigen

Neben einer verflüssigenden Wirkung kann bei höheren Dosierungen auch eine höhere Viskosität beobachtet werden. Das Zusammenhaltevermögen der Mischungen steigt, so dass Bluten und Entmischen reduziert werden [50].

Allgemein ist mit dem Lufteintrag in den Leim oder Frischbeton stets ein Festigkeitsabfall des erhärteten Stoffes verbunden [115].

Luftporenbildner

Luftporenbildner werden in der Regel eingesetzt, um die Frost- und Frost-Taumittelbeständigkeit von Betonen zu erhöhen. Anwendungsziel ist das kontrollierte Einführen vor allem von Mikroluftporen mit einer Größe von weniger als $0,3\text{ mm}$. Diese sind auch bei Wassersättigung des Betons meist nicht vollständig mit Wasser gefüllt und bieten daher Expansionsräume für gefrierendes Wasser aus den Kapillarporen. Luftporenbildner werden häufig auf Wurzelharzbasis hergestellt. Mittlerweile sind jedoch auch synthetische Luftporenbildner auf Tensidbasis weit verbreitet. Wie schon angesprochen, besteht die Aufgabe der Luftporenbildner in der Stabilisierung von Luftblasen, die durch den Mischprozess in das Mischgut eingetragen werden. Daher sind die erreichten

Luftgehalte nicht allein von der Wirksamkeit des Luftporenbildners, sondern auch wesentlich vom Lufteintrag und somit von den rheologischen Eigenschaften des Mischguts sowie vom Mischverfahren, der Geometrie des Mixers und der Mischwerkzeuge und der eingebrachten Mischenergie abhängig (vgl. Abschnitt 2.5.1). Darüber hinaus beeinflussen zahlreiche weitere Faktoren die Wirksamkeit der Luftporenbildner bzw. die resultierenden Luftgehalte [50, 58, 115, 51, 18]:

- **Mahlfeinheit des Zements**
Mit steigender spezifischer Oberfläche des Zementes verringert sich das Luftporenvolumen.
- **chemische Bestandteile des Zements**
Verschiedene chemische Bestandteile oder auch Verunreinigungen des Zements können unterschiedliche Einflüsse auf die Bildung und Stabilität von Luftporen haben. Mit steigendem Alkaligehalt im Zement wurde ein zunehmender Lufteintrag in den Beton beobachtet. Sulfate und z.T. auch Hüttensandanteile hingegen wirken sich eher ungünstig aus. Gleiches gilt auch bereits für geringe Verunreinigungen durch (Schmier-)Öle etc.
- **Wassergehalt**
Mit steigendem Wassergehalt nimmt der Lufteintrag und somit das Luftporenvolumen zu.
- **entschäumende Verbrennungsrückstände bei Flugaschen**
- **Sandgehalt**
Mit steigendem Sandgehalt nimmt auch der Luftgehalt in Betonen zu. Dieses gilt für Betone mit und ohne Luftporenbildner.
- **Betontemperatur**
Bei vergleichenden Untersuchungen zeigte sich, dass die eingebrachten Luftgehalte mit zunehmender Betontemperatur abnahmen.
- **Wechselwirkungen mit anderen Zusatzmitteln**
Insbesondere mit alten Entschäumertypen wurden negative Wechselwirkungen beobachtet. Neuere Entschäumer, wie sie z.B. in Fließmitteln auf Basis von Polycarboxylatethern verwendet werden, sind meist verträglich. Für Dispergierhilfen, wie sie z.B. in Silika-Slurries verwendet werden, kann ein negativer Einfluss auf die Blasenstabilität nicht ausgeschlossen werden, bislang wurden jedoch keine Probleme festgestellt bzw. dokumentiert.

Nach [58] sind Luftporenbildner auf Tensidbasis deutlich unanfälliger gegenüber Beeinträchtigungen ihrer Wirksamkeit durch andere Stoffe als solche auf Wurzelharzbasis.

Schaummittel

Schaummittel werden auf Grundlage von Tensiden oder Proteinen hergestellt. Da ihre Wirkung auf den polaren Gruppen der Tensid- bzw. Proteinmoleküle basiert, muss bei der Wahl der Wirkstoffe besonders darauf geachtet werden, dass es nur in möglichst geringem Umfang zu Eingriffen in die Zementchemie kommt. Insbesondere die hohe Ionen-Konzentration und der hohe pH-Wert im Zementleim reduzieren oder unterdrücken die aufschäumende Wirkung vieler Tensid- und Proteinarten. Die Zusatzmittelindustrie bietet heute eine Reihe von erprobten Schaumbildnern an, die speziell für die Verwendung in zementgebundenen Baustoffen entwickelt wurden. Teilweise sind diesen Schaumbildnern bereits organische Verbindungen als Schaumzusatzstoffe zugegeben (vgl. Abschnitt 2.4.2), um eine bessere Stabilisierung des Schaums zu erreichen.

Schaummittel werden meist stark mit Wasser verdünnt zu möglichst geschlossenzelligen Schäumen verarbeitet, die dann unter Leime, Mörtel oder Betone gemischt werden. Bei der Schaumzugabe ist zu beachten, dass neben dem Wirkstoff auch eine bedeutende Menge Wasser zugegeben wird. Dieses ist ggf. bei der Rezepturentwicklung zu berücksichtigen. Für die Dosierung der Schäume ist es erforderlich, die Schaumrohddichte zu bestimmen. Diese variiert je nach Schaummittel, Aufschäumverfahren und ggf. Einstellungen des zur Schaumherstellung verwendeten Schaumgenerators. Neben der Schaumrohddichte ist zur zielgenauen Dosierung auch ein bekannter Zusammenhang zwischen der zugegebenen Schaummenge und der resultierenden Luftporenmenge im Leim, Mörtel oder Beton erforderlich. Dieser Zusammenhang wird überwiegend von den vorgenannten Parametern beeinflusst, die auch die Wirksamkeit der Luftporenbildner beeinflussen. Es sind mehrere Untersuchungen durchgeführt worden [71, 70], die darauf hindeuten, dass sich reproduzierbare Abhängigkeiten zwischen Schaumdosierung und Luftgehalt ermitteln lassen. Diese wiesen jedoch insbesondere bei höheren Luftgehalten eine deutliche Abhängigkeit von den verwendeten Ausgangsstoffen sowie den Mischbedingungen auf.

Für die vorliegende Arbeit wurde auf eine direkte Zugabe von Schaumbildnern in den Bindemittelleim zurückgegriffen. In diesem Fall wird die zum Aufschäumen erforderliche Luft während des Mischprozesses eingebracht. Um die entste-

henden Poren zu stabilisieren, ist ein zügiger Besatz der Grenzflächen mit den Tensiden oder Proteinen des Schaummittels erforderlich. Hier greifen in besonderem Maße die Einflüsse der Beweglichkeit der Moleküle, wie sie im Abschnitt 2.3 dargestellt sind.

Schaummittel aus Tensiden und Proteinen unterscheiden sich auch in ihren Einflüssen auf die rheologischen Eigenschaften der Leime und der resultierenden Stabilität der aufgeschäumten Leime. Genauere Untersuchungen zu den rheologischen Auswirkungen sind jedoch derzeit nicht bekannt. Die Wirksamkeit unterschiedlicher Schaummittel hinsichtlich erreichbarer Porenvolumina und Porengrößen wurde in [60] untersucht.

3.2.8 Stabilisierer

Stabilisierer sollen vor allem bei weichen Betonkonsistenzen Entmischungen verhindern und die Homogenität des Frischbetons verbessern. Insbesondere sollen sie auch das Sedimentieren und Bluten (Wasserabsondern) der Betone unterdrücken bzw. reduzieren. Gleichzeitig wird der Zusammenhalt der Mischung verbessert, was sich positiv auf die Verarbeitungseigenschaften auswirkt. Ein Nebeneffekt aus den rheologischen Veränderungen der Leime bei Verwendung von Stabilisierern ist fast immer ein erhöhter Luftporengehalt, da die im Mischprozess eingebrachte Luft durch den besseren Zusammenhalt der Mischung schlechter entweichen kann. Daher werden Stabilisierer bei Porenleichtbetonen gezielt angewendet, um das Porensystem zu stabilisieren. Bei hohen Dosierungen kann der Beton klebrig und sehr zähflüssig werden [112, 89].

Stabilisierer können nach den verwendeten Wirkstoffen in zwei Hauptgruppen unterteilt werden:

- organische Polymere
- feinkörnige anorganische Substanzen mit hohem Wasserrückhaltevermögen

Organische Polymere

Die Organischen Polymere können nach [16] weiter unterteilt werden in

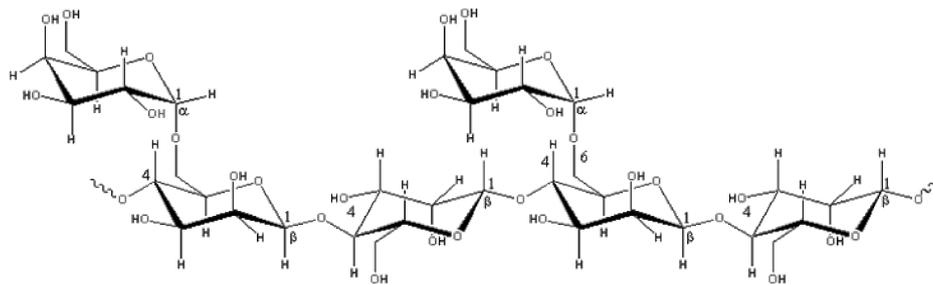
- natürliche Polymere (z.B. Stärke, Biopolymere, natürliche Gummimodifikationen)

- halbsynthetische Polymere (z.B. Cellulose-Derivate)
- synthetische Polymere (z.B. Polyethylen-Oxid, Polyacrylate)

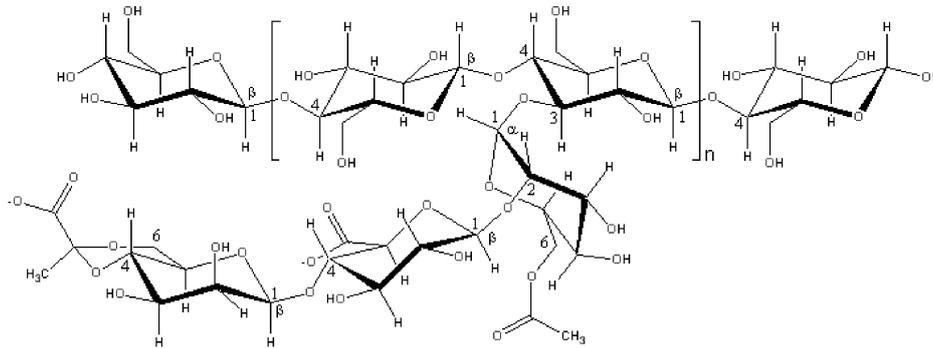
Polymere entstehen durch die Verbindung von niedermolekularen, reaktionsfähigen Molekülen (Monomeren). Sie können sich sowohl in der Art der Monomere auf denen sie basieren als auch in der Zahl der verbundenen Monomere und der räumlichen Anordnung unterscheiden. Ausgehend von diesen erheblichen Variationsmöglichkeiten können bei der künstlichen Herstellung der Polymere im Rahmen der Polymerisation oder der Substitution von bestehenden (z.B. natürlichen) Polymeren nahezu unendlich viele unterschiedliche Polymertypen generiert werden. Dabei ist eine Beschreibung der Molekülstruktur auf Grund statistischer Unregelmäßigkeiten in den chemischen Prozessen nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit möglich, was im Gegenzug bedeutet, dass neben den beschriebenen Molekülen stets auch Variationen von ihnen vorliegen. Eine genaue Beschreibung der Funktion einzelner Polymere bzw. einzelner markteingeführter Produkte erfolgt an dieser Stelle nicht. In vielen Fällen ist dieses in dem komplexen chemischen Zusammenspiel der verschiedenen Ausgangsstoffe eines Zementleims auch nicht eindeutig zu erfassen. Daher wird im Weiteren nur die prinzipielle Wirkungsweise der Polymere als stabilisierende Wirkstoffe erläutert.

Bei den organischen Polymeren handelt es sich, wie bereits erwähnt, um Molekülketten oder (stark) verzweigte Makromoleküle (vgl. Abbildung 3.13) [66, 92]. Ihre Eigenschaften werden geprägt von einer großen Anzahl funktioneller, d.h. reaktionsfähiger Gruppen. Meist handelt es sich dabei um Hydroxylgruppen. Werden diese Makromoleküle in wässrige Systeme, wie z.B. Zementleime, eingebracht, binden sie an ihren funktionellen Gruppen in erheblichem Umfang andere Moleküle, insbesondere Wassermoleküle. Während Wassermoleküle untereinander nur sehr kurzzeitige Bindungen (Wasserstoffbrückenbindungen) eingehen, die bereits nach Bruchteilen von Sekunden wieder gelöst werden, um dann Bindungen mit einem anderen Wassermolekül zu ermöglichen, sind die Bindungen an die Polymere deutlich dauerhafter. Durch die Größe und Trägheit der entstehenden Molekülkonglomerate sowie die sich ergebenden räumlichen Verzahnungen steigen die Viskosität und Fließgrenze und in der Folge reduzieren sich Entmischungserscheinungen [66].

Nach [40] hat die Untersuchung von verschiedenen Stärkeethern zwei unterschiedliche Verhaltenstypen hinsichtlich der Dosierung ergeben (vgl. Abbildung 3.14).



Guar Gum



Xanthan Gum

Abbildung 3.13: Strukturdarstellung zweier Polymere, die Ausgangsstoffe für verschiedene organische Stabilisierer sind, aus [21]

An gleicher Stelle wurde auch ein erheblicher Einfluss des pH-Wertes sowie der Gegenwart von Calcium-Ionen (aus Zementen bzw. durch zusätzliche Zugabe) auf den Verdickungseffekt nachgewiesen. Die produktspezifischen Eigenschaften differierten hier jedoch sehr stark, so dass eine allgemeingültige Aussage zu bestimmten Abhängigkeiten nicht möglich war. Auch Einflüsse aus der Temperatur spielen eine erhebliche Rolle für den Verdickungseffekt. Hier kann tendenziell davon ausgegangen werden, dass der Temperatureinfluss mit steigendem Substitutionsgrad zunimmt [126].

Je nach Art der Monomere, aus denen die Polymere hergestellt werden, und den Bedingungen unter denen die Polymerisation erfolgt, kann die Größe der Polymere, der Grad ihrer Verzweigung und die Anzahl und Art der funktionellen Gruppen beeinflusst werden [92]. Dadurch ist es möglich, die rheologischen Parameter Viskosität und Fließgrenze zu steuern. Zwar können beide nicht völlig unabhängig voneinander beeinflusst werden, eine Schwerpunktsetzung auf die Beeinflussung des einen oder anderen Parameters bei den Produkten und somit in der Anwendung ist jedoch möglich.

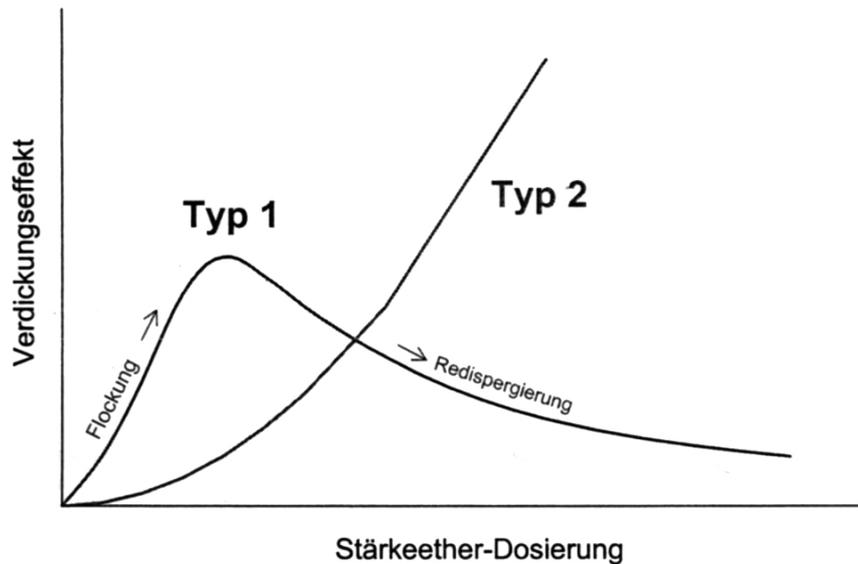


Abbildung 3.14: Qualitative Darstellung des Verdickungseffekts verschiedener Stärkeether in Abhängigkeit von der Dosierung, aus [40]

Darüber hinaus können die Polymere teilweise auf Grund ihrer polaren Gruppen oberflächenaktive Eigenschaften haben, die ähnliche Wirkungen wie bei Luftporenbildnern, Schaummitteln oder Fließmitteln/Betonverflüssigern zur Folge haben. Auf den Einfluss der Molekülgröße in diesem Zusammenhang wurde bereits bei den Proteinschaumbildnern in Abschnitt 2.3.2 und den Polycarboxylatethern in Abschnitt 3.2.6 eingegangen. Weiterhin wirken sich organische Polymere im Allgemeinen verzögernd auf die Hydratation und Festigkeitsentwicklung von Zementen aus.

Feinkörnige anorganische Substanzen

Stabilisierer auf Basis feinkörniger anorganischer Substanzen bestehen im Bereich der Betonzusatzmittel in der Regel aus wässrigen Dispersionen von Silikastäuben oder synthetischen Kieselsäuren [54]. Ihre Wirkungsweise ist bereits im Abschnitt Silikastäube (3.2.5) erläutert, wobei im Bereich der Stabilisierer oft noch feinere Silikastäube (mittlere Teilchengröße von ca. $0,015 \mu m$) verwendet werden als bei der direkten Zugabe als Betonzusatzstoff. Dieses führt zu einer nochmals erheblich größeren spezifischen Oberfläche und einem entsprechend ausgeprägteren Wasserrückhaltevermögen. In vielen Fällen werden den Silikastaubsuspensionen Dispergierhilfen zugesetzt, um Agglomerationen zu vermeiden. Diese Dispergierhilfen können auch im Zementleim oder Beton verflüssigend wirken. Sie sind zwar in der Regel so ausgewählt und dosiert, dass

sie die stabilisierende Wirkung der Silikastäube nicht aufheben, es kann jedoch zu Beeinträchtigungen der Wirksamkeit oder zu Wechselwirkungen mit anderen Ausgangsstoffen kommen.

3.3 Zeitliche Veränderungen

Weitere Einflüsse auf das rheologische Verhalten und das Verformungsverhalten von Zementleimen ergeben sich aus zeitlichen Veränderungen. Diese werden einerseits durch chemische Reaktionen im Zementleim ausgelöst, andererseits sind auch äußere Einflüsse wie Wasserverlust durch Verdunstung möglich. Da die Liste der möglichen Einflüsse sehr umfangreich sein kann, werden im Folgenden mit der Zementhydratation und der Wasserabgabe nur die zwei wesentlichsten Aspekte der zeitabhängigen Veränderungen von frischen Zementleimen aufgezeigt.

3.3.1 Zementhydratation

Mit der Zugabe von Wasser zum Zement beginnen die Hydratationsreaktionen, die anfangs ein geringes und nach einiger Zeit verstärktes Ansteifen der Zementleime zur Folge haben. Ursache für dieses Ansteifen ist die Bildung von kurzen, säulenförmigen Ettringitkristallen auf den Oberflächen der Zementklinkerpartikel. Zusätzlich bilden sich erste Calciumsilicathydrate in kolloidaler Form. Nach Ausbildung einer dünnen Schicht von Hydratationsprodukten auf den Zementklinkerpartikeln beruhigt sich der Hydratationsprozess zunächst. Diese Anfangsreaktionen führen zu einer Veränderung der Zementoberflächen. Im Allgemeinen werden diese Oberflächen durch das Kristallwachstum deutlich rauher. Daher kommt es zu einem Ansteifen des Leims, der aber nach wie vor seine Verformbarkeit behält [112]. In rheologischen Untersuchungen kann dieses durch ein Ansteigen der Viskosität und der Fließgrenze beobachtet werden.

Nach einigen Stunden bilden sich zunächst erste feine, spitznadelige, faserförmige Calciumsilikathydratkristalle. Sie leiten den Abschluss der Ruhephase ein, der in eine Periode intensiver Hydratation mündet, in der sich ein Grundgefüge bestehend aus Calciumsilikathydratfaserbüscheln, -blattstrukturen, plattigem Calciumhydroxid und lang wachsenden Ettringitkristallen aufbaut. Das Kristallwachstum führt dabei zur Überbrückung der Zwischenräume zwischen den Zementkörnern und zu einer zunehmenden Vernadelung bzw. Verzahnung. Die

Zementkörner sind dadurch nicht mehr gegeneinander verschieblich, wodurch der Zementleim als Ganzes zunächst erstarrt und sich dann mit abnehmender Geschwindigkeit weiter verfestigt [112]. In dieser Phase steigen Viskosität und Fließgrenze rasch an, bis keine fluiden Eigenschaften mehr vorliegen.

Der Ablauf der Hydratation ist schematisch in Abbildung 3.15 dargestellt.

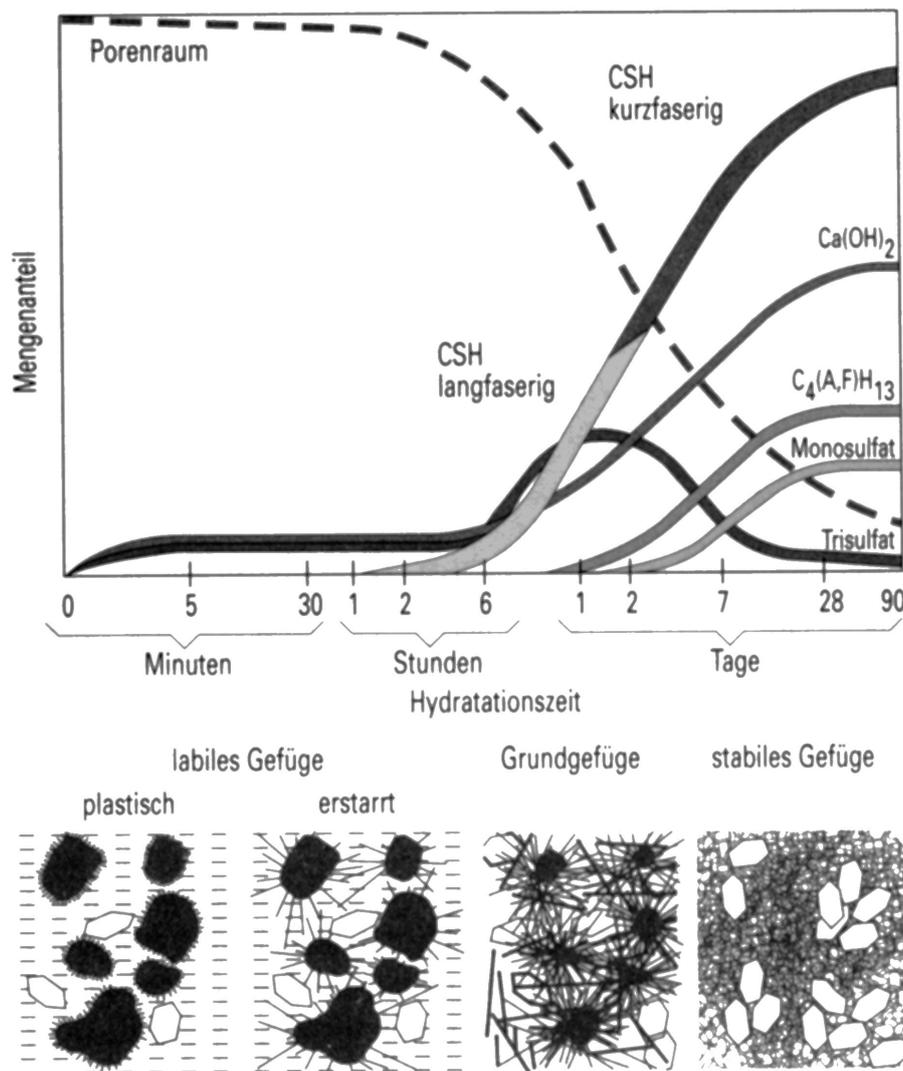


Abbildung 3.15: Schematische Darstellung der Bildung der Hydratphasen und der Gefügeentwicklung bei der Hydratation des Zements, nach [90]

Eine weitere Folge der Hydratationsprozesse ist eine Volumenreduzierung der Leimphase. Bei der Hydratation werden ca. 22 bis 26 % der Zementmasse an Wasser chemisch gebunden. Die dabei entstehenden Hydratationsprodukte nehmen in ihrer Gesamtheit ein geringeres Volumen ein als zuvor die Ausgangsstoffe. Daher kommt es zu einer Volumenverringerung des Zementsteins um ca. 25 Vol.-% des Wassers das chemisch gebundenen wird (chemisches Schwinden) [43].

Steht ausreichend Wasser zur Verfügung, entspricht dieses ungefähr 18 % des ursprünglichen Zementvolumens. Diese Volumenreduktion führt zur Entstehung feiner Poren (Schrumpfporen) in einer Größenordnung von ca. 10 nm, ist jedoch nach außen nicht messbar. Bei geringen w/z-Werten kommt es darüber hinaus noch zu einer inneren Selbstaustrocknung, die nennenswerte äußere Volumenveränderungen hervorruft (autogenes Schwinden) [91]. Neben der chemischen Bindung von Wasser führt die Hydratation auch zu einer physikalischen Bindung von Wasser. Bedingt durch das Kristallwachstum entstehen kleinste, wassergefüllte und nach außen abgeschlossene Poren (Gelporen), in denen an den Kristalloberflächen angelagerte Wassermoleküle eingeschlossen werden. Physikalisch werden ca. 14 % der Zementmasse an Wasser gebunden. Dieses Wasser kann unter normalen Umständen nicht aus dem Zementstein verdunsten, bei sehr hohen Temperaturen jedoch verdampfen [120].

3.3.2 Wasserabgabe an die Umgebung

Eine Wasserabgabe an die Umgebung kann im Wesentlichen auf vier Arten erfolgen:

- Wasserabsonderungen durch Entmischungserscheinungen des Leims
- schnelle Verdunstung an freien Oberflächen
- Wasserentzug durch angrenzende saugende Materialien
- sukzessives Austrocknen des Leims bis zum Feuchteausgleich mit der Umgebung

Auf die Wasserabsonderungen durch Entmischungserscheinungen soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden, da diese mit Maßnahmen der Rezepturentwicklung, beispielsweise durch Zugabe stabilisierender Zusatzmittel, vermieden werden sollten. Die entsprechenden stofflichen Möglichkeiten wurden bereits zuvor erläutert.

Eine Verdunstung von Wasser an freien Oberflächen sowie der Wasserentzug durch angrenzende, saugende Materialien haben zwar unterschiedliche Ursachen, unterscheiden sich jedoch in ihrer Wirkung nicht wesentlich. Zu beachten ist allerdings, dass sich zwischen Zementleimen und saugenden Materialien die relative Feuchte in der Regel angleicht, wodurch sich der Wasserentzug nach

und nach verlangsamt und letztlich zum Erliegen kommt. Im Gegensatz dazu kommt es über freien Oberflächen normalerweise zu einer Luftzirkulation, die die verdunstete Feuchte abführt. Daher kommt der Verdunstungsvorgang in der Regel erst zum Stillstand, wenn sich die relative Feuchte des Zementleims der meist deutlich geringeren Umgebungsfeuchte angepasst hat.

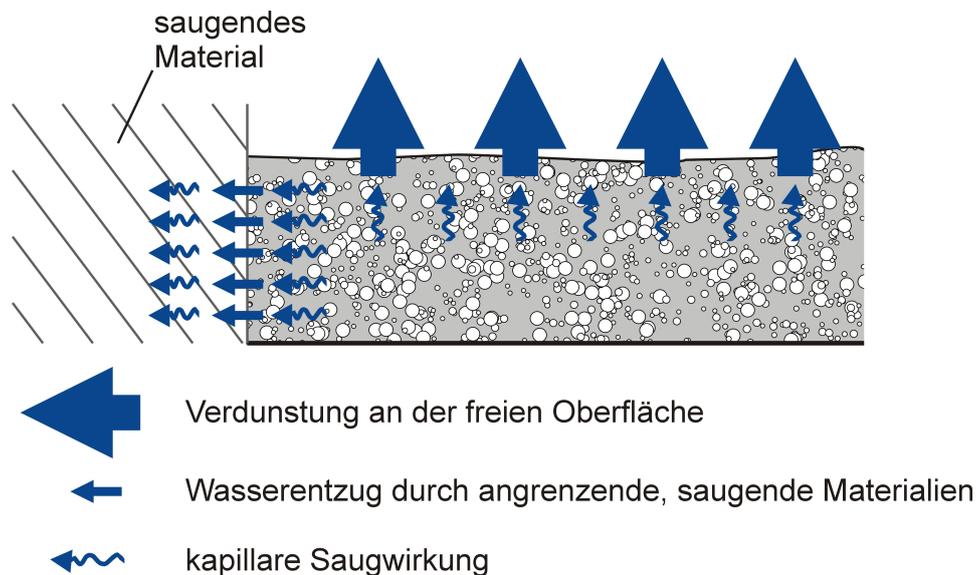


Abbildung 3.16: Prinzipskizze zu Verdunstung und Wasserentzug durch saugende Materialien

In beiden Fällen führt die Wasserabgabe unmittelbar zu einer Reduzierung des Wassergehalts in der Nähe der Grenzfläche. Außerdem entsteht eine kapillare Saugwirkung, durch die auch tieferen Schichten durch Kapillarporen Feuchtigkeit entzogen wird. In der Folge dieser Reduzierung des Wassergehalts kann es zu einer verminderten Zementhydratation kommen, sofern die vorhandene Feuchtigkeit nicht mehr ausreicht, um eine vollständige Hydratation des Zements zu gewährleisten. Dieses bedingt geringere Festigkeiten des erhärteten Zementsteins insbesondere im Randbereich. Darüber hinaus führt der Wasserentzug zu einer Verringerung des gesamten Leimvolumens um das Volumen des entzogenen Wassers (Kapillarschwinden). In der Betontechnologie können diese Verformungen des frischen Zementleims durch die Wahl der Mischungszusammensetzung und richtige Vorbehandlung der saugenden Materialien (z.B. Wässern) bzw. Nachbehandlung der freien Oberfläche meist auf ein vernachlässigbares Maß reduziert werden [80]. Vor dem Hintergrund der hohen chemischen und mechanischen Sensibilität von Schaumsystemen ist eine wirkungsvolle Nachbehandlung oft nicht möglich. Daher stellt das Kapillarschwinden einen wesentlichen Faktor für die Stabilität von aufgeschäumten Zementleimen dar.

Mit dem sukzessiven Austrocknen des Leims geht das Trocknungsschwinden einher. Es stellt bei herkömmlichen w/z -Werten den wesentlichen Anteil der Schwindverformungen von Zementleimen dar [80]. Das Trocknungsschwinden wird im Wesentlichen durch den Wasserverlust des Leims bestimmt. Es erfolgt von der äußeren Oberfläche nach innen, wobei seine Geschwindigkeit durch die Geschwindigkeit der Diffusionsprozesse im Leim bzw. im erhärteten Zementstein bestimmt wird. Mit der Reduzierung der relativen Feuchte geht eine Leimkontraktion einher, die entsprechend von außen nach innen fortschreitet und zu äußeren Verformungen und inneren Spannungen führt. Letztere entladen sich teilweise in Rissen.

Es ist bekannt, dass reine Zementleime hohe Schwindverformungen aufweisen, die mit zunehmender Porosität nochmals anwachsen. Bei Schaumbetonen mit geringen Rohdichten unter $1,0 \text{ kg/dm}^3$ ist mit einem mehrfach stärkeren Schwinden zu rechnen als bei Normalbetonen [43, 36].

4 Entwicklung von Theorien zu zementgebundenen Schaumstrukturen

In diesem Kapitel wird aufbauend auf den zuvor erläuterten schaum- und beton-technologischen Grundlagen ein theoretischer Ansatz für die Rezepturenentwicklung und Herstellung zementgebundener Schäume entwickelt. Die spezifischen Wirkungsweisen der einzelnen Ausgangsstoffe werden mit den Erfordernissen des Herstellungsprozesses und der Schaumstabilisierung verglichen. Daraus werden eine Modellvorstellung für das Zusammenwirken der Ausgangsstoffe in aufgeschäumten Zementleimen und Anhaltspunkte für die Rezepturgestaltung von Zementschäumen hergeleitet.

Klar abgegrenzt von herkömmlichen Porenbetonen, die den chemischen Schäumen zuzuordnen sind, behandelt diese Arbeit die Herstellung zementgebundener physikalischer Schäume. Der Lufteintrag in den Leim erfolgt hier auf mechanischem Weg.

Anders als z.B. bei Metallschäumen, deren chemische Zusammensetzung in der Regel exakt vorgegeben werden kann und deren Erstarrungsverhalten daher in Verbindung mit thermischen Randbedingungen gezielt einstellbar ist, handelt es sich bei Zementleimen um Stoffgemische, deren chemische Zusammensetzung sehr komplex und im Detail nicht genau bekannt ist. Bei den zahlreichen unterschiedlichen im Zementleim ablaufenden chemischen Reaktionen entstehen darüber hinaus ständig neue Reaktionsprodukte, die ihrerseits erneut als Ausgangsstoff für weitere Reaktionen dienen. Bislang sind von Stark (z.B. in [93, 105]) und anderen viele der auftretenden Reaktionen weitgehend isoliert beschrieben worden. In ihrer Gesamtheit mit den Wechselwirkungen und Einflüssen unterschiedlichster Zusatzmittel, Zusatzstoffe und erwünschter sowie unerwünschter Nebenbestandteile des Zements kann der Hydratations- und Erhärtungsprozess jedoch nicht geschlossen dargestellt werden. Unter diesen Bedingungen ist eine chemische Optimierung der Leimzusammensetzung nach dem Vorbild von Metallegierungen, wie sie für Metallschäume verwendet werden, nicht möglich. Stattdessen ist es erforderlich, prinzipielle Auswirkungen unterschiedlicher Aus-

gangsstoffe auf den Leim bzw. den Aufschäumvorgang und die Verarbeitbarkeit zu beschreiben. So können Grundlagen für die Rezepturentwicklung der Leime durch Beschreibung des Anforderungsprofils und Zuordnung von Wirkprinzipien der unterschiedlichen Ausgangsstoffe herausgearbeitet werden.

4.1 Charakterisierung von Zementschäumen

Ähnlich wie bei Leicht-, Schaum- oder Porenbetonen sind die charakteristischen Größen geschäumter Zementleime vor allem die Rohdichte, die Festigkeit sowie ggf. die Wärmeleitfähigkeit. Diese Größen sind in der Baupraxis entscheidend für die Festlegung möglicher Einsatzbereiche und die Verwendung der geschäumten Leime. Darüber hinaus können weitere Merkmale wie die Verwendung spezieller Ausgangsstoffe, andere spezifische Eigenschaften (z.B. Porenstruktur) oder Herstellungsverfahren zur Charakterisierung der Schäume herangezogen werden.

4.1.1 Rohdichte, Porosität und Porenstruktur

Die Rohdichte der Zementleime bewegt sich auf Grund der betontechnologischen Randbedingungen (Rohdichte üblicher Ausgangsstoffe, Wahl technisch sinnvoller w/z-Wert, etc.) in relativ engen Grenzen. Tabelle 4.1 veranschaulicht dieses unter Vernachlässigung von Zusatzmitteln anhand von einigen exemplarischen Leimrezepturen mit unterschiedlichen w/z-Werten und Zusatzstoffen.

Tabelle 4.1: Rohdichtevergleich unterschiedlicher fiktiver Zementleime

Rezeptur		R 1	R 2	R 3	R 4	R 5
w/z-Wert		0,4	0,4	0,6	0,4	0,6
	Rohdichte [kg/dm ³]	Einwaage [kg/dm ³]				
Zement	3,1	1,384	1,200	1,000	1,200	1,000
Wasser	1,0	0,553	0,480	0,600	0,480	0,600
Flugasche	2,3		0,306	0,178		
Kalksteinmehl	2,7				0,359	0,209
Rohdichte [kg/dm ³]		1,937	1,986	1,778	2,039	1,809

Daraus ergibt sich, dass das zentrale Instrument zur Einstellung der Rohdichte der Luftgehalt des geschäumten Zementleims ist. Da auch die maximal erreichbare Festigkeit sowie die Wärmeleitfähigkeit aufgeschäumter Zementleime und

Mörtel primär von ihrem Luftgehalt und der Porenstruktur abhängt und nur nachrangig von der Leimrezeptur [70], sind auch diese Größen an die Rohdichte gekoppelt.

Der zentralen Bedeutung der Rohdichte bzw. des Luftgehalts steht die Frage der technisch erreichbaren und für die Verarbeitung und Nutzung sinnvollen Luftgehalte gegenüber, die den Mittelpunkt der weiteren Betrachtungen bildet.

Grundsätzlich kann für die Charakterisierung aufgeschäumter Zementleime im Zeitfenster von Herstellung und Verarbeitung eine Klassifizierung nach Abbildung 2.1 in Polyederschäume, Kugelschäume und Blasensysteme übernommen werden. Abbildung 4.1 verdeutlicht auf der Grundlage einer fiktiven wässrigen Phase mit einer Rohdichte von $2,0 \text{ kg/dm}^3$ (in Anlehnung an die Zementleime aus Tabelle 4.1) den Zusammenhang zwischen Porenstruktur, Luftgehalt und Rohdichte eines Schaums.

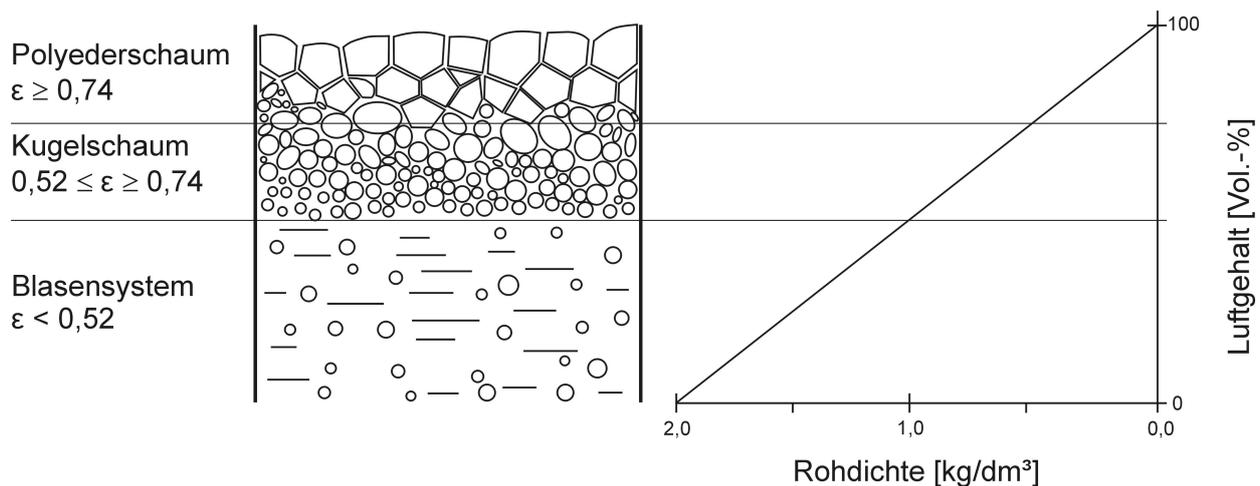


Abbildung 4.1: Zusammenhang zwischen Porenstruktur, Luftgehalt und Rohdichte einer fiktiven wässrigen Phase mit einer Rohdichte von $2,0 \text{ kg/dm}^3$

Polyederschäume

Speziell im Bereich hoher Luftgehalte vernachlässigt die auf den Erkenntnissen wässriger Schäume basierende Abbildung 4.1 den Einfluss der Partikelgröße sowie den Einfluss der veränderten rheologischen Eigenschaften von Zementleimen gegenüber wässrigen Lösungen. Während die Ausdehnung eines Wassermoleküls bei ca. 150 pm liegt, werden mittlere Radien von Zementkörnern mit ca. $1\text{-}10 \text{ }\mu\text{m}$ und somit um den Faktor 10^4 bis 10^5 größer angegeben. Daraus wird unmittelbar deutlich, dass für Zementleim, der überwiegend aus Zementkörnern

mit freien und angelagerten Wassermolekülen besteht, bei einer homogenen Verteilung der Zementkörner die minimalen Wanddicken zwischen den Blasen um einige Zehnerpotenzen größer sind als bei wässrigen Schäumen. Bei mikroskopischen Untersuchungen von aufgeschäumten Zementleimen wurden im erhärteten Zustand minimale Lamellendicken von ca. 20-30 μm gemessen.

Ausgehend von diesen Größenordnungen und unter Berücksichtigung der ca. um den Faktor zwei größeren Ausgangsdichte eines Zementleims gegenüber einer wässrigen Lösung ist der wesentlich größere Einfluss der Schwerkraft auf die Blasenstruktur unmittelbar ersichtlich. Der auf die Lamellen einwirkenden Schwerkraft wirken zwei stabilisierende Effekte entgegen. Dieses sind zum einen der innere Zusammenhalt, d.h. die Zähigkeit des Leims, die eine begrenzte Aufnahme von Zugspannungen erlaubt und zum anderen der Laplace-Druck im Inneren der Blase, der mit der Oberflächenspannung im Gleichgewicht steht und einer Verformung der Lamellen entgegenwirkt (vgl. Abschnitt 2.4.2).

Eine Beeinflussung der Oberflächenspannungen ist durch den Einsatz grenzflächenaktiver Stoffe möglich. Mit steigender Konzentration verringern sie die Oberflächenspannungen. Dieses ermöglicht geringere Krümmungsradien der Lamellen und somit kleinere Blasen. Da so der Abstand der Knotenpunkte kleiner wird, verringert sich die Spannweite der Lamellen. Das führt zu einer Stabilisierung des Schaums. Eine Verkleinerung der Blasen erfordert jedoch eine größere Anzahl Blasen und somit auch eine größere Anzahl trennender Lamellen. Da die minimale Dicke dieser Lamellen weniger von der Blasengröße als von den Eigenschaften des Zementleims bestimmt wird und daher nach unten begrenzt ist, führen reduzierte Blasengrößen zu einer Veränderung der Anteile von Zementleim und Luft, hin zu geringeren maximalen Luftgehalten und höheren Rohdichten. Extrem hohe Luftgehalte können daher nur durch große, sich in ihrer Form wechselseitig beeinflussende Blasen erreicht werden, die dünne, lange und wenig gekrümmte Lamellen aufweisen (Polyederschäume). Werden derartige Strukturen unter Verwendung von Zementleimen hergestellt, sind jedoch die aus den Oberflächenspannungen resultierenden Kräfte gering, verglichen mit den Schwerkrafteinflüssen. Letztere können daher nur durch die Aufnahme von Zug- und Druckkräften in den Lamellen ausgeglichen werden. Bei fluiden Stoffen ist dieses nur sehr eingeschränkt und nur dann möglich, wenn sie eine stark ausgeprägte Zähigkeit aufweisen. In diesem Fall ist jedoch ein effektives mechanisches Aufschäumen, wie in Abschnitt 2.5.1 erläutert, und eine Verarbeitbarkeit im herkömmlichen Sinne nicht mehr möglich. Daher ist die mechanische Herstellung eines stabilen Polyederschaums aus Zementleim ausgeschlossen.

Darüber hinaus sind die sehr dünnen Lamellen von Polyederschäumen oder Kugelschäumen an der Grenze zu Polyederschäumen in frischem, flüssigem Zustand sehr empfindlich. Sowohl äußere Einflüsse aus Transport und Verarbeitung (z.B. Scherkräfte) als auch innere Veränderungen wie Drainageeffekte und Austrocknung führen fast unmittelbar zum Reißen von Lamellen und zur Zerstörung von Blasen bzw. zur Blasenkoaleszenz. Blasenkoaleszenzen erfordern bei Polyederschäumen auch eine wesentliche Verformung der Lamellen zahlreicher angrenzender Blasen, da die vorhandenen Spannungen in den Lamellen einen neuen Gleichgewichtszustand erreichen müssen (vgl. Abschnitt 2.4.2). Diese Verformungsfähigkeit ist bei Zementleimen im Ansteifungsprozess mit zunehmender Viskosität und Fließgrenze nur bedingt gegeben. Dadurch kommt es oft zu einer Art Kettenreaktion, bei der das Versagen einer Lamelle nicht mehr durch die Verformung der anderen Lamellen aufgefangen wird, sondern stattdessen das Versagen weiterer schwacher Lamellen in der Umgebung nach sich zieht. Das führt zu einer bereichsweisen Zerstörung der Blasen. Bereiche mit geringfügig stabileren Lamellen bleiben dabei in ihrer Struktur als separate „Flocken“ erhalten, die untereinander nur noch punktuell verbunden sind oder ggf. durch die weiter fortschreitende Hydratation des Zements an den Kontaktstellen erneut zusammenwachsen. Dabei erlangen sie jedoch nur noch sehr geringe, technisch nicht nutzbare Festigkeiten. Insgesamt verleiht dieses dem erhärteten Schaum eine körnig wirkende Struktur (Abbildung 4.2).



Abbildung 4.2: Schaum mit körniger Struktur

Ansätze zur Herstellung zementgebundener Polyederschäume können lediglich im Bereich der Porenbetonherstellung umgesetzt werden. Dort erfolgt der Luft eintrag nicht mechanisch, sondern chemisch, weshalb sehr zähflüssige Leime zum Einsatz kommen können. Diese werden bis zur Erhärtung keinen mechanischen Einflüssen, wohl aber optimal abgestimmten klimatischen Bedingungen ausgesetzt (Autoklavierung), die zu einer schnellen Erhärtung ohne Feuchtigkeitsverlust führen. Eine robuste Herstellung und Anwendung von Polyederschäumen im Baustellenbereich ist wegen ihrer Sensibilität ausgeschlossen.

Kugelschäume

Als baupraktisch relevant können daher nur Kugelschäume angesehen werden. Auch für diese sind die veränderten Randbedingungen, die sich aus den Partikelgrößen ergeben, zu beachten. Daher können für Kugelschäume ebenfalls nicht die Kennwerte der wässrigen Systeme wie in Kapitel 2 und Abbildung 4.1 übernommen werden. Neben den Partikelgrößen gibt es weitere Einflüsse aus der Blasengrößenverteilung. Ähnlich wie bei den Sieblinien der Gesteinskörnungen beeinflussen auch die minimalen und maximalen Porengrößen sowie deren Verteilung die maximal erreichbare Porosität. Mit einem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Programm kann, basierend auf einem numerischen Ansatz aus [114], in Abhängigkeit von der Lamellendicke sowie einem minimalen und maximalen Porendurchmesser eine Abschätzung der geometrisch maximal erreichbaren Porosität erfolgen. Abbildung 4.3 stellt diese Einflüsse als Ergebnis von Modellrechnungen mit dem Programm dar.

Der Darstellung liegen ein maximaler Porenradius von 1 *mm*, minimale Porenradien zwischen 0,001 und 0,999 *mm* sowie Lamellendicken zwischen 0,01 und 1 *mm* zugrunde.

Durch lichtmikroskopische Untersuchungen einiger geschlossenzelliger Proben konnte festgestellt werden, dass sich neben der schon genannten minimalen Lamellendicke von ca. 0,02 *mm* oftmals ein Größenverhältnis zwischen größten und kleinsten Poren von $R/r = 10$ ergibt. Ausgehend von diesen Werten ist also mit einer maximal möglichen Porosität von 0,75 zu rechnen. Dieser Wert stellt jedoch ein geometrisches Maximum dar, das von einer idealen Verteilung der Porengrößen ausgeht und nicht die Einflüsse des Herstellungsprozesses (Mischen) berücksichtigt. Während in der Simulationsrechnung jedem Porenzwischenraum, soweit möglich, eine Pore mit dem jeweils optimalen Durchmesser aus dem Intervall $r_{min} \leq r \leq r_{max}$ einbeschrieben wird, ist in der Praxis die

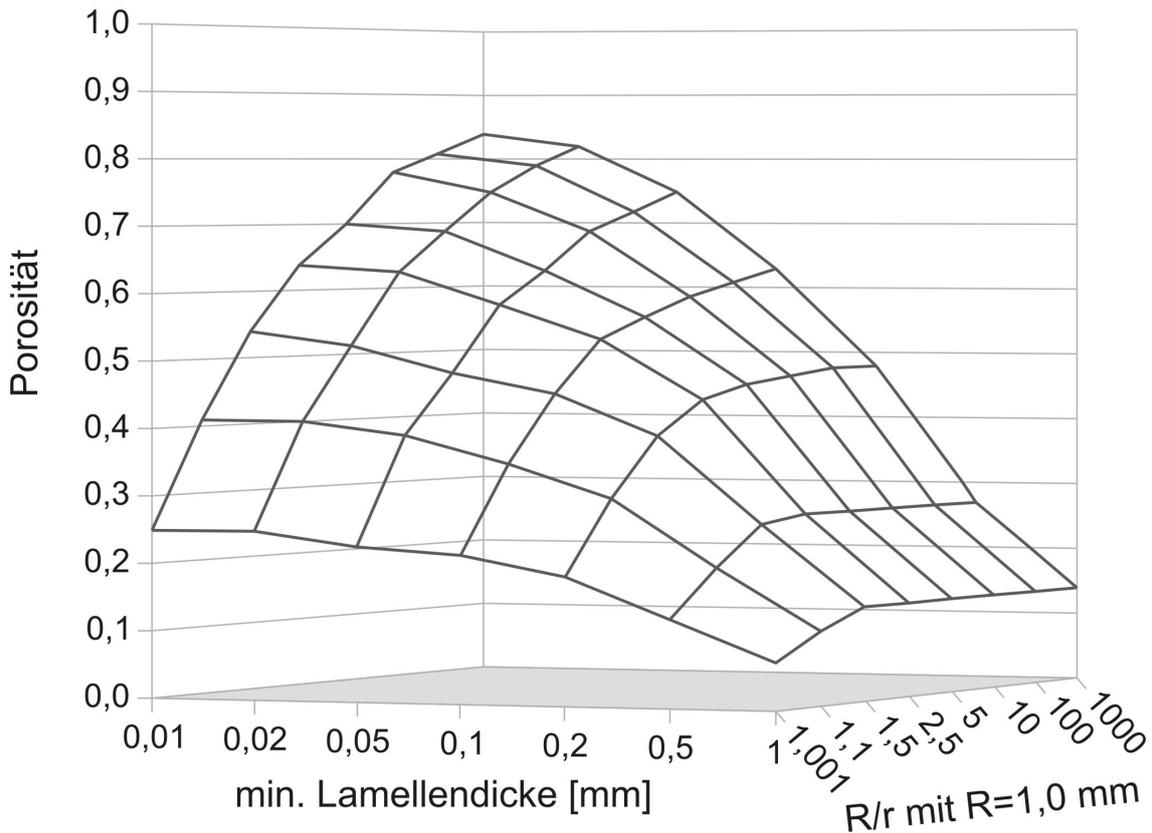


Abbildung 4.3: Ergebnisse einer Modellrechnung zur maximalen Porosität von Zementleimen, in Abhängigkeit von der minimalen Lamellendicke und dem Verhältnis zwischen größtem und kleinstem Porenradius (R/r)

Porengrößenverteilung vom Verfahren der Herstellung und weiteren chemischen und physikalischen Randbedingungen abhängig (vgl. Abschnitt 4.2.3). Neben der idealen Porengrößenverteilung ist auch die optimale Packungsdichte der Poren für das Erreichen maximaler Porengehalte notwendig. Ein Verdichten der Poren, wie es z.B. bei Sandschüttungen durch Vibration erreicht werden kann, ist nicht möglich, da anders als bei Feststoffschüttungen hier die entstehenden Kräfte nicht von Pore zu Pore, sondern über die fluide, kontinuierliche Phase (Zementleim) abgetragen werden. Die Stabilität des Systems beruht daher wesentlich auf der Fließgrenze des Leims, die bei mechanischer Verdichtung überschritten wird, was den Schaum insgesamt destabilisiert oder zerstört. Daher werden in der praktischen Anwendung stets deutlich geringere Luftgehalte erreicht als rechnerisch möglich.

Grundsätzlich muss bei der Betrachtung von Porenstrukturen zwischen dem frischen, flüssigen Schaum und dem ausgehärteten Schaum unterschieden werden. Es ist zu beachten, dass sich die Porenstruktur des Zementschaums während der Erhärtung verändert. Ausschlaggebend für diese Veränderungen sind

neben den zerstörenden Einflüssen auf den Schaum nach Abschnitt 2.4.1 auch die zeitlichen Veränderungen des Leims. Dieses betrifft sowohl die rheologische Veränderung (Ansteifen, Erstarren, Erhärten) als auch die volumetrische Verringerung (Schwinden) des Leimanteils durch den Hydratationsprozess und Austrocknungserscheinungen (vgl. Abschnitt 3.3).

Dieses Verhalten beinhaltet einerseits die Chance geringere Festrohdichten zu erreichen als dies durch die geometrischen Randbedingungen für die flüssigen Leime möglich ist, andererseits kann es jedoch auch zur teilweisen oder vollständigen Zerstörung des Schaums bis zur Erhärtungsphase führen oder seine Porenstruktur grundlegend verändern. So kann ein lokales Versagen einzelner Lamellen bei fortgeschrittenem Ansteifen/Erstarren zu Porensystemen aus sich überschneidenden Kugelporen führen (vgl. Abbildung 4.4). Auf den Entstehungsprozess dieser Porensysteme wird in Abschnitt 4.2.4 noch näher eingegangen.

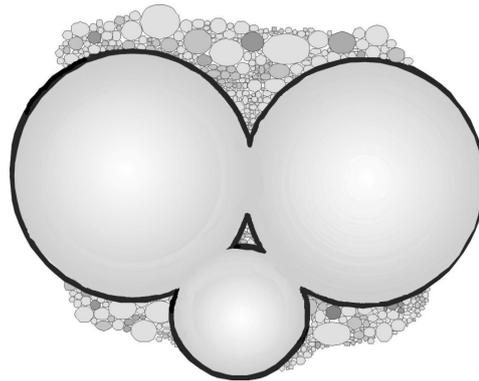


Abbildung 4.4: Sich überschneidende Kugelporen in erhärtendem Zementleim

Einen zusätzlichen Einfluss auf diese Entwicklungen können neben der Volumenveränderung auch chemische Effekte haben. So ändern sich beispielsweise die Oberflächenspannungen mit der Zusammensetzung des Leims (z.B. Wasseranteil, Reaktionsprodukte) oder neue Reaktionsprodukte mit polaren Gruppen greifen direkt in das empfindliche Gleichgewicht der interpartikularen Kräfte ein. Derartige sich auf molekularer Ebene abspielende Effekte konnten allerdings im Rahmen dieser Arbeit weder qualitativ noch quantitativ untersucht werden.

Abbildung 4.5 zeigt die Bruchfläche eines erhärteten Kugelschaums mit einem Luftgehalt von ca. 55 Vol.-%.

Der optische Eindruck suggeriert einen höheren Luftgehalt, was daran liegt, dass

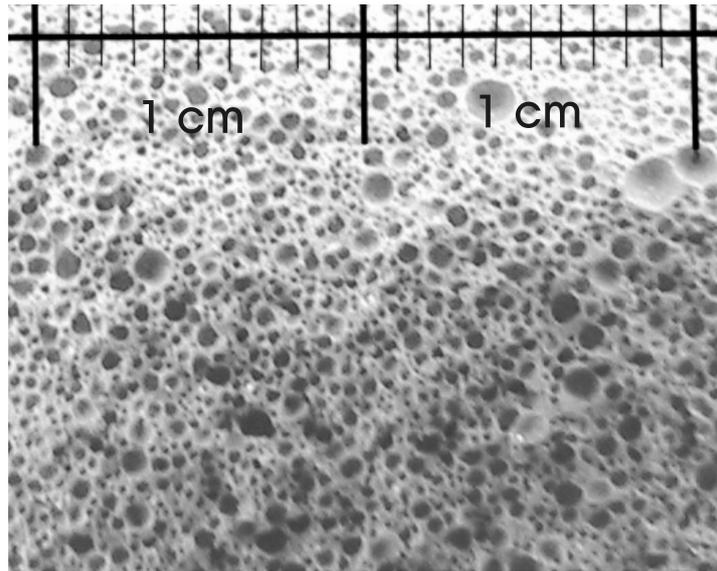


Abbildung 4.5: Kugelschaum mit ca. 55 Vol.-% Luft

beim Bruchversagen in der Regel die dünnsten und daher schwächsten Stellen der Lamellen versagen. Dadurch ist der Zementsteinanteil in einer Bruchfläche unterdurchschnittlich niedrig. Gut erkennbar ist die relativ gleichmäßige Mindestdicke der Lamellen sowie die Porengrößenverteilung.

Blasensysteme

Bei geringen Luftgehalten stellen sich Blasensysteme wie in Abschnitt 2.1.1 beschrieben ein. Diese entsprechen vom Porositätsgrad nicht den in dieser Arbeit angestrebten Schäumen, sondern sind mit den Leimen üblicher Luftporenbetone vergleichbar. Daher wird auf sie nicht weiter eingegangen. Wesentliche im Weiteren herausgearbeitete Zusammenhänge sind aber auch für zementgebundene Blasensysteme in gleicher Weise gültig.

4.1.2 Ausgangsstoffe und Eigenschaftsprofile

Für eine Charakterisierung der geschäumten Zementleime auf Grundlage der Ausgangsstoffe bietet sich vor allem der Typ des verwendeten Schaummittels an. Hier sind in erster Linie Schaummittel auf Tensid- und auf Proteinbasis zu unterscheiden. Wie in den folgenden Abschnitten noch genauer erläutert, unterscheiden sich Zementschäume der beiden Schaummitteltypen in einigen Eigenschaften deutlich. Dennoch erscheint es nicht sinnvoll, diese verschiedenen

Schäume grundsätzlich gegeneinander abzugrenzen, da die wesentlichen Wirkmechanismen beider Schaummittel (vgl. Abschnitt 2.3) zumindest ähnlich sind und vergleichbare Ergebnisse liefern können.

Auch die Verwendung unterschiedlicher Zemente, Zusatzmittel oder Zusatzstoffe lässt keine so prägenden Veränderungen der Eigenschaftsprofile erwarten, dass eine Charakterisierung der Schäume nach diesen Stoffen gerechtfertigt ist. Daher wird im Weiteren auf eine Charakterisierung nach Ausgangsstoffen oder anderen als den mit Rohdichte und Porenstruktur verbundenen Eigenschaften abgesehen.

4.2 Aspekte der Herstellung von zementgebundenen Schäumen und Modellbildung

4.2.1 Grundlagen der Betontechnologie und Anforderungen aus der Verarbeitbarkeit

Bei der Rezepturenentwicklung von aufschäumbaren Zementleimen sind die Grundlagen der allgemeinen Betontechnologie zu berücksichtigen. Dieses gilt insbesondere für das Verhältnis von Wasser und Zement (w/z -Wert) sowie z.T. auch für die Überlegungen zur Packungsdichte der verwendeten Feststoffe. Hinsichtlich des w/z -Wertes sind zwei konträre Einflüsse zu beachten, zum einen eine ausreichende Menge freies Wasser, um die Ausbildung stabiler Porenwänden zu ermöglichen (vgl. Abschnitt 4.2.2), zum anderen eine hinreichende Festigkeitsentwicklung des erhärteten Zementsteins, um eine genügende Festigkeit bzw. Tragfähigkeit für den jeweiligen Anwendungsbereich sicherzustellen. Wie bereits dargestellt, hängt die Festigkeit des erhärteten Zementschaums primär von dem Porengehalt und nur sekundär von Rezeptureinflüssen wie dem w/z -Wert ab. Dennoch ist insbesondere vor dem Hintergrund der Zugabe erheblicher Mengen flüssiger Zusatzmittel (Fließmittel, Schaummittel, Silikasstaub-Suspension) die Einhaltung eines ausreichenden Zementgehalts zu beachten. Durch die massiven Eingriffe der Zusatzmittel in die chemischen Reaktionen und die dadurch bedingten vielfach verzögernden Wirkungen ist neben dem absoluten Zementgehalt vor allem auf eine ausreichende Menge Portlandzementklinker zu achten. Diese ist erforderlich, um einen Hydratationsprozess mit hinreichender Geschwindigkeit sicherzustellen. Zementschäume unter Verwendung von Zementen mit geringem Portlandzementklinkeranteil und gleichzeitig sehr hohen

Zusatzmittelgehalten erreichten teilweise erst nach mehreren Wochen oder nie eine für das Ausschalen ausreichende Festigkeit. Sehr hohe Anteile Portlandzementklinker führen jedoch zu ausgeprägten, in Abschnitt 4.2.5 näher erläuterten Schwinderscheinungen und beeinträchtigen daher auch die Herstellung von stabilen, aufgeschäumten Zementleimen. In der konkreten Rezepturentwicklung ist unter Berücksichtigung der verwendeten Zusatzstoffe und Zusatzmittel ein geeigneter Zementklinkeranteil abzuschätzen bzw. in Vorversuchen zu ermitteln. Nur so kann einerseits der Schaum in praxistauglichen Zeiträumen eine Festigkeit entwickeln, die eine praktische Nutzung ermöglicht, und andererseits eine Minimierung der Schwindverformungen stattfinden.

Aus der Verarbeitbarkeit ergeben sich zwei Anforderungen an den Leim. Zum einen muss er während des gesamten Transports vom Mischer bis in die Schalung stabil gegen Entlüften sein, zum anderen muss er rheologisch so beschaffen sein, dass er ohne den Einsatz von Verdichtungsenergie ein vollständiges Ausfüllen der Schalung auch in Randbereichen sicherstellt. Die Stabilität gegen Entlüften kann nach Gleichung 2.6 primär durch eine erhöhte Viskosität des Leimes sichergestellt werden. Mit zunehmender Leimviskosität wird dem Auftrieb der Luftblasen eine steigende Kraft entgegengesetzt. Bei ausreichend hoher Viskosität wird ein Aufsteigen von Luftblasen gänzlich unterbunden. Insbesondere im Ruhezustand kann der Schaum also durch Einstellen der Leimviskosität stabilisiert werden.

Wird der Schaum hingegen bewegt, z.B. durch Fließ- oder Pumpvorgänge, muss zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit nicht mehr allein die Rheologie des Leims, sondern auch die Rheologie des Schaums als Gesamtsystem betrachtet werden. Allgemein können Schäume als strukturviskose Fluide charakterisiert werden. Die rheologischen Parameter des Schaums lassen sich, wie in Abschnitt 2.6 dargestellt, nicht unmittelbar aus denen des Leims ableiten. Stattdessen sind sie wesentlich von der Porenstruktur des Schaums abhängig. Diese wiederum verändert sich in Abhängigkeit von der Scherrate und der Viskosität der kontinuierlichen Phase (Zementleim). Um Fließvorgänge bereits mit geringem Energieeintrag zu ermöglichen, z.B. allein unter Schwerkrafteinwirkung, ist eine geringe Schaumviskosität anzustreben. Dieses Ziel kann durch die deutliche Abnahme der Schaumviskosität mit einsetzenden Scherungen erreicht werden. Wie bereits in Abbildung 2.29 dargestellt, ergibt sich dieses durch scherinduzierte Streckung der Luftporen in Fließrichtung. Die zur Verformung der Poren nötige Energie wird sowohl von der Porengröße und dem damit korrespondierenden Innendruck der Poren (Gibbs-Effekt, Abschnitt 2.4.2) als auch von der Fluid-

viskosität beeinflusst. Sie wird somit geringer, je geringer die Leimviskosität ist und je größer die Poren sind.

Bei Leimen mit hoher Viskosität und hohen Porenanteilen besteht die Gefahr, dass unter Scherbeanspruchung schwache Lamellen zwischen den Blasen versagen, wodurch die angrenzenden Lamellen entsprechend höhere Scherkräfte aufnehmen müssen und ggf. ebenso versagen. Dadurch kann es zur Ausbildung von Scherflächen innerhalb des Leims kommen. Insbesondere bei Rohrströmungen kann dies zu einer Veränderung des wirksamen Rohrquerschnitts führen und erhebliche Auswirkungen auf den Stofftransport haben.

Die transportbedingten Einflüsse stellen somit einen begrenzenden Faktor für die Blasengröße und Leimviskosität dar.

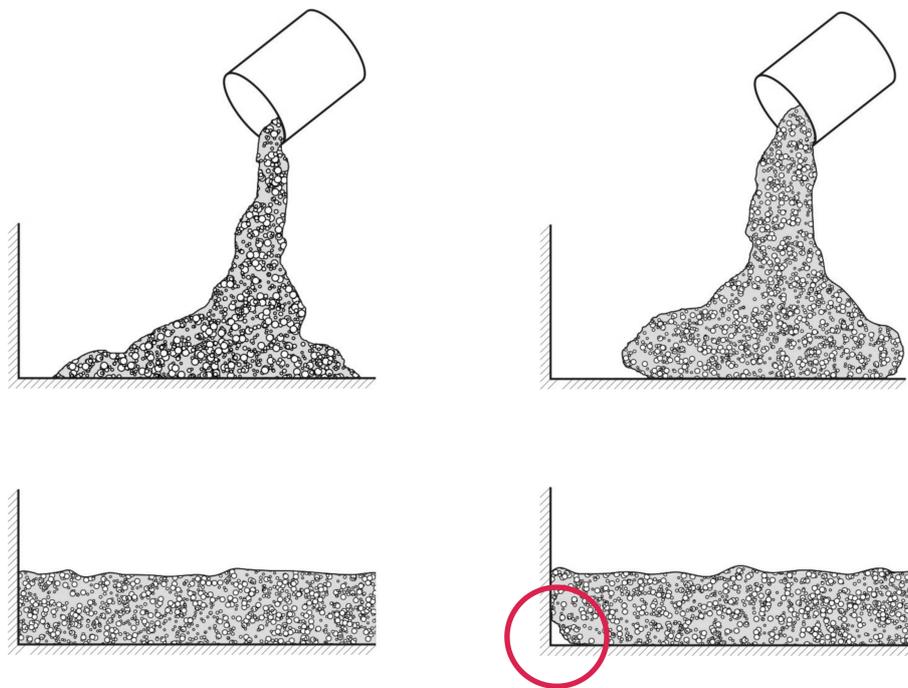


Abbildung 4.6: Fließvorgang in eine Form ohne (links) und mit (rechts) Lufteinschluss, abhängig vom Benetzungsverhalten des Zementschaums

Ein weiterer für die Verarbeitbarkeit relevanter Parameter ist die benetzende Wirkung der frischen Zementschäume. Hier gelten prinzipiell die gleichen Gesetzmäßigkeiten wie sie in Abschnitt 2.4.2 für die Benetzung von Partikeln in Flüssigkeiten geschildert wurden. Da Grenzflächenspannungen extrem sensibel auf kleinste Veränderungen der chemischen Zusammensetzung, der Temperatur, etc. reagieren, ist eine quantitative Bestimmung der Grenzflächenspannung von Zementleimen an Feststoffoberflächen (z.B. Schalungsoberflächen) nicht zielführend. Da die Grenzflächenspannungen jedoch vom Verhältnis der inneren

Kräfte des Fluids zu den Wechselwirkungskräften zwischen Fluid und Feststoff abhängen, neigen Leime mit starkem inneren Zusammenhalt, d.h. hoher Viskosität, unabhängig von der Beschaffenheit der Oberfläche eher zu einem ungünstigen, nicht benetzenden Verhalten. Wie in Abbildung 4.6 dargestellt, bereitet ein solches nicht benetzendes Verhalten beim Ausfüllen einer Schalung insbesondere in Ecken und bei schwierigen Geometrien erhebliche Probleme, da es zu größeren Lufteinschlüssen kommen kann. Diese behindern ein vollständiges Ausfüllen der Schalung. Während bei Normalbetonen derartige Lufteinschlüsse durch das Verdichten vermieden werden, sind geschäumte Zementleime, ähnlich wie Selbstverdichtende Betone, für derartige Lufteinschlüsse anfällig, da sie ohne zusätzliche Verdichtungsarbeit eingebracht werden müssen. Auch hier ist also eine nicht zu hohe Zementschaumviskosität erforderlich, um eine fehlerfreie Verarbeitung zu ermöglichen.

Die Verarbeitbarkeit wird also durch zwei konkurrierende Anforderungen an die Viskosität des Leims beeinflusst. Zum einen muss die Viskosität ausreichend hoch sein, um ein Entlüften zu verhindern, zum anderen ist eine geringe Viskosität erforderlich, um Fließvorgänge und ein vollständiges Ausfüllen der Formen zu ermöglichen.

4.2.2 Ausbildung von Grenzflächen an den Porenwandungen

Die Entstehung von Grenzschichten zwischen flüssigen und gasförmigen Stoffen sowie die Möglichkeiten diese zu stabilisieren und somit stabile Schäume herzustellen sind in Kapitel 2 detailliert beschrieben. Von diesen Grundlagen ausgehend, werden im Weiteren die Voraussetzungen für die Schaumbildung mit Zementleimen als kontinuierliche Phase entwickelt und dargestellt. Dabei wird insbesondere auf die Einflüsse, die sich aus den Eigenschaften des Zementleims als Suspension sowie aus der Zugabe unterschiedlicher Zusatzmittel ergeben, eingegangen.

Um im erhärteten Zustand eines Zementleims eine ausreichende Festigkeit gewährleisten zu können, wird in der Betontechnologie der w/z -Wert nach oben begrenzt. Bei der Hydratation von Zement werden ca. 38 % des Zementgewichts an Wasser gebunden. Wird mehr Wasser zugegeben, verbleibt dieses überschüssige Wasser zunächst ungenutzt im Leim, trocknet dann aus und hinterlässt Porenräume, die das Gefüge schwächen. Heute übliche w/z -Werte für Betone liegen daher zwischen 0,4 und 0,75, die von Zementleimen ohne Gesteinskörnung

etwas darunter. Um eine ausreichende Festigkeit des Schaumgerüsts sicherzustellen, sollte der w/z -Wert auch für die aufschäumbaren Zementleime nicht wesentlich höher liegen.

Kornhaufwerke mit einem Wassergehalt am bzw. knapp unter dem in Abschnitt 3.1 beschriebenen Sättigungspunkt weisen zwar eine für den Schaum günstige hohe Stabilität ohne Entmischungsneigung auf, erfüllen jedoch nicht die rheologischen Voraussetzungen für die Schaumherstellung und Verarbeitung hinsichtlich Fließfähigkeit und Viskosität. Ihre Oberflächenbeschaffenheit ist darüber hinaus nicht geeignet, stabile Grenzflächen mit einem gleichmäßigen Besatz durch grenzflächenaktive Stoffe zu ermöglichen.

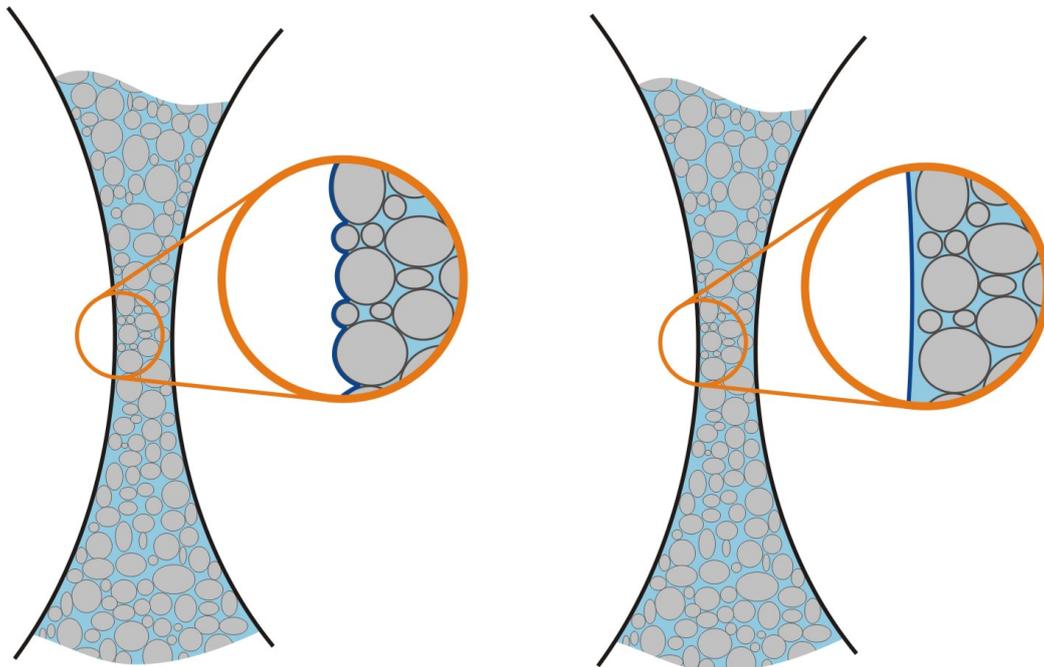


Abbildung 4.7: Blasenoberfläche bei geringen (links) und höheren (rechts) Wassergehalten

Nach Abschnitt 2.4.2 ist die Grundvoraussetzung für eine stabile Blase ein gleichmäßiger Besatz der Blasenoberfläche mit grenzflächenaktiven Stoffen. Diese reduzieren die Oberflächenspannung so weit, dass äußere Kräfte und Zugkräfte in der Blasenhülle mit der Oberflächenspannung und dem radiusabhängigen Laplace-Druck im Gleichgewicht stehen. Wie aus Abbildung 4.7, links deutlich wird, haben Leime mit geringem Wassergehalt bis zum Sättigungspunkt eine raue Oberfläche. Die Partikeloberflächen sind zwar benetzt und die innen liegenden Zwickel ggf. vollständig mit Wasser gefüllt, im Randbereich zwischen den Feststoffpartikeln tritt der Wasserfilm jedoch stets zurück. Es kann sich somit keine glatte Blasenoberfläche ausbilden. Stattdessen stellt die Blasenoberfläche

eine Berg-und-Tal-Landschaft dar. Der makroskopisch wahrgenommene Blasen­durchmesser wird in der Blasenwand von unregelmäßigen mikroskopischen Radien überlagert. Dieses führt dazu, dass die Krümmung der Oberfläche lokal sehr stark differiert, was bei konstantem Laplace-Druck zu sehr unterschiedlichen erforderlichen Oberflächenspannungen führt. Nach Gleichung 2.8 erfordern kleine Radien geringere Oberflächenspannungen. Damit geht einher, dass in diesen Bereichen hohe Konzentrationen grenzflächenaktiver Stoffe vorherrschen müssen (vgl. Abschnitt 2.3). Abbildung 4.8 veranschaulicht jedoch, dass die Abstoßungskräfte der polaren Gruppen der grenzflächenaktiven Stoffe oft zu einem geringeren Oberflächenbesatz führen. Somit ergeben sich Schwachstellen in der Blasen­hülle, die zu einer Zerstörung der Blase führen können.

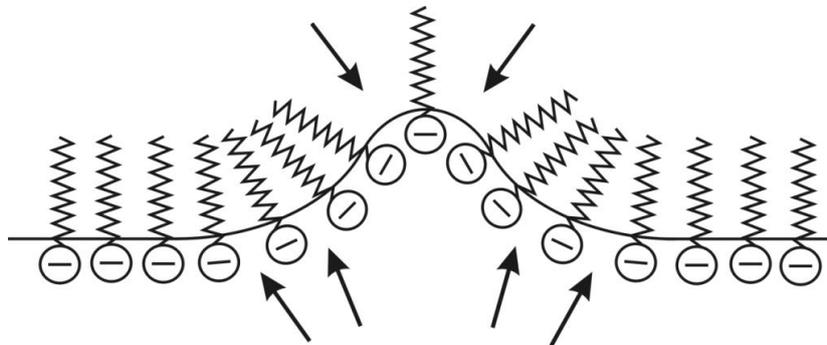


Abbildung 4.8: Schema der Verteilung grenzflächenaktiver Stoffe bei unregelmäßiger Oberfläche

Dieser Destabilisierung der Blasen kann durch eine Erhöhung des Wassergehalts entgegengewirkt werden. Bei ausreichendem Angebot an freiem Wasser, das weder an den Oberflächen noch durch Kapillarkräfte gebunden ist, kommt es entsprechend dem Marangoni-Effekt (Abschnitt 2.4.2) zu einer Glättung der Oberfläche durch Auffüllen der Einschnitte zwischen den Feststoffpartikeln mit Wasser (vgl. Abbildung 4.7, rechts).

Ein weiterer Vorteil mit Erhöhung des Wassergehalts ergibt sich aus der größeren Mobilität der grenzflächenaktiven Stoffe. Dabei spielen zwei Aspekte eine Rolle

- die Größe der Moleküle im Verhältnis zur Wasserfilmdicke
- der Abstand der Moleküle von Oberflächenladungen an Feststoffen

Die Stabilisierung der im Aufschäumprozess entstandenen Blasen erfordert eine zügige Belegung der Grenzflächen mit den Tensiden bzw. Proteinen. Um dieses

zu erreichen, muss die Konzentration des grenzflächenaktiven Stoffes so hoch sein, dass in der Umgebung frisch entstandener Grenzflächen stets eine ausreichende Anzahl freier Tensid- oder Proteinmoleküle vorliegt. Außerdem müssen die Moleküle den Weg zur Grenzfläche in hinreichend kurzer Zeit zurücklegen können. Dieses wird in Gleichung 2.4 durch die Abhängigkeit der Grenzflächenbeladung von einem Diffusionskoeffizienten D dargestellt. Der Diffusionskoeffizient hängt vom Widerstand ab, den das Molekül auf seinem Weg zur Grenzfläche überwinden muss. Dieser Widerstand ist in Analogie zum spezifischen Widerstand in der Elektrotechnik von der Leiterlänge sowie dem Leiterquerschnitt abhängig. Da die Molekülbewegung nur in der flüssigen Phase stattfindet, d.h. die Wasserfilme um und zwischen den Feststoffen übernehmen die Leiterfunktion, wird mit höherem Wassergehalt sowohl der Leiterquerschnitt vergrößert als auch, wie Abbildung 4.9 veranschaulicht, die Leiterlänge reduziert.

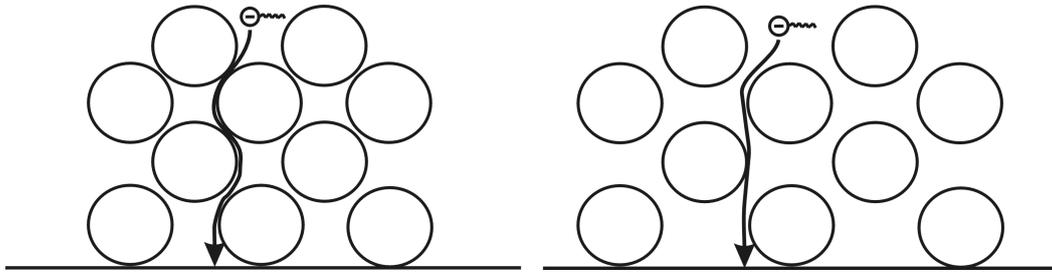


Abbildung 4.9: Widerstand bei Molekülbewegung: links geringer Wassergehalt, daher langer Weg und geringe Querschnitte; rechts: höherer Wassergehalt, daher kürzerer Weg und größere Querschnitte

Dieses wirkt sich sowohl auf Tensid- als auch auf Proteinschaumbildner aus. Bei den Proteinen, die als Makromoleküle um einige 10er-Potenzen größer sind als die üblichen Tensidmoleküle (vgl. Abschnitt 2.3.2), ist die Wirkung allerdings deutlich ausgeprägter.

Ein weiterer Aspekt mit Einfluss auf die wirksame Molekülkonzentration der grenzflächenaktiven Stoffe ist deren Adsorption an Partikeloberflächen. Obwohl Schaumbildner chemisch so beschaffen sind, dass sie sich primär an Grenzschichten flüssig-gasförmig anlagern, beruht ihre Adsorption letztlich auf polaren Gruppen, die bei Vorhandensein entsprechender Oberflächenladungen auch eine Bindung mit Feststoffpartikeln möglich machen. Je geringer der Abstand der Feststoffpartikel untereinander ist, desto geringer ist auch der mittlere Abstand der zwischen den Feststoffen befindlichen Tensid- oder Proteinmoleküle zur nächsten Partikeloberfläche. Entsprechend größer ist dadurch die Wahrscheinlichkeit einer Molekülbeeinflussung durch vorhandene Oberflächenladun-

gen (s. Abbildung 4.10). Auch vor diesem Hintergrund ist auf einen ausreichenden Wassergehalt zu achten.

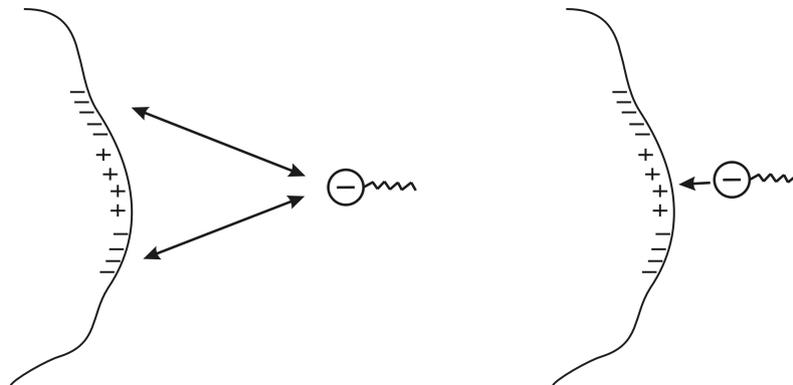


Abbildung 4.10: Molekülbeeinflussung durch Oberflächenladungen auf Feststoffpartikeln: links großer Abstand, abstoßende Kräfte überwiegen; rechts: kleiner Abstand, anziehende Kräfte überwiegen

Entsprechend dieser Beeinflussung der Tensid- und Proteinmoleküle durch Feststoffe kann es umgekehrt auch zu einer Anlagerung von Fließmittelmolekülen an Blasenoberflächen kommen. Zwar sind Fließmittelmoleküle ihrerseits speziell auf die Adsorption an Zementpartikeln abgestimmt, ihre polaren Gruppen haben jedoch in begrenztem Maße auch grenzflächenaktive Wirkungen, d.h. sie können ebenfalls zur Blasenstabilisierung beitragen. Dies ist ein Grund, warum der Einsatz von Fließmitteln oft mit der in Abschnitt 3.2.6 genannten Erhöhung des Luftgehalts einhergeht.

Aus der Darstellung der Einflüsse des Wassergehalts wird also deutlich, dass zur Entstehung und Stabilisierung der Blasen im Herstellungsprozess ein ausreichend hoher Wassergehalt erforderlich ist.

Bei der Wahl des Schaummittels gelten auch für Zementleime die in Abschnitt 2.3 beschriebenen grundsätzlichen Eigenschaften der Tenside und Proteine. Während die Tenside auf Grund ihrer geringen Größe eine hohe Mobilität aufweisen und daher Grenzflächen sehr schnell besetzen, sind die großen Protein-Makromoleküle sehr träge. Durch ihre räumliche Ausdehnung und die Tendenz zu einer Filmbildung um die Blasenoberflächen ist die stabilisierende Wirkung der Proteine im Gegenzug deutlich höher als die der Tenside. Die Herstellung von aufgeschäumten Zementleimen ist jedoch mit beiden Typen gleichermaßen möglich. Ein Nachteil der Proteine, vor allem in höherer Konzentration, besteht in einer deutlichen Geruchsentwicklung, die z.T. über längere Zeit anhält. Ob es darüber hinaus zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen durch Ausgasungen

kommen kann wurde im Rahmen dieser Arbeit weder recherchiert noch untersucht.

4.2.3 Rheologische Einflüsse auf das Aufschäumen von Zementleimen

Misch- und Herstellverfahren

Wie in Abschnitt 2.5 dargelegt, ist schon das ansatzweise numerische Nachvollziehen von Misch- und Aufschäumvorgängen sehr kompliziert. Dieses gilt bereits für vergleichsweise einfache 2-Stoff-Systeme. Die detaillierte numerische Beschreibung von Misch- und Aufschäumvorgängen komplexer Systeme wie Zementleim oder Beton aus einer Vielzahl unterschiedlicher fester, flüssiger und gelöster Stoffe ist daher derzeit nicht möglich. Dennoch können auf Basis der beschriebenen prinzipiellen Zusammenhänge Überlegungen zur Auslegung der Leimrezepturen sowie zur Wahl geeigneter Misch- und Aufschäumverfahren erörtert werden.

Für die Herstellung von aufgeschäumten Fluiden sind grundsätzlich zwei Verfahrensschritte zu unterscheiden, zum einen das Einbringen der Luft in die kontinuierliche Phase, zum anderen das Dispergieren der eingebrachten Luft. Das Aufschäumen von Zementleimen erfordert darüber hinaus mit der Herstellung des Leims einen weiteren, dritten Verfahrensschritt. Dabei handelt es sich primär um das Homogenisieren eines Wasser-Feststoffgemischs. Entsprechende Mischaufgaben können in der Betontechnologie je nach Zusammensetzung des Mischguts vom gleichmäßigen Benetzen von Feststoffoberflächen bis hin zum Aufschluss von Partikelagglomerationen und zur Dispergierung von Feinstoffen in einer Flüssigkeit reichen. Dafür geeignete Mischer stehen in den mit Beton und Zementleimen arbeitenden Laboren und Firmen zur Verfügung. Allgemein kann in diesen aus der klassischen Betontechnologie bekannten Mixern von überwiegend laminaren Strömungsverhältnissen ausgegangen werden. Sie sind in der Regel so ausgelegt, dass sie einen möglichst geringen Lufteintrag in die Mischung hervorrufen. Daher sind sie zwar zum Mischen und Dispergieren, nicht aber zum Aufschäumen auf Basis selbstansaugender Begasung geeignet. Auch die Möglichkeit einer separaten Luftzuführung ist bei diesen Mixern nicht sinnvoll. Da sie meist ein sehr geringes Verhältnis von Bauhöhe zu Grundfläche sowie wandnahe Rührorgane haben (vgl. Abbildung 4.11), sind sie auf vorwiegend vertikalen Mischguttransport ausgelegt. Bei lokaler Lufteinleitung, z.B. durch Lanzen, bedarf es daher erheblicher Mischzeiten, um eine homogene

Blasenverteilung an jeder Stelle des Mixers zu gewährleisten. Auf Grund des Vertikaltransports und der großen Mischgutoberfläche besteht darüber hinaus eine ausgeprägte Tendenz zum Entlüften. Eine flächige Einleitung der Luft, z.B. durch Siebböden, ist nicht praktikabel, da Wasser und feine Feststoffpartikel, unter Einwirkung der Mischwerkzeuge auch gegen einen anstehenden Luftdruck, durch den Siebboden aus dem Mischbehälter austreten können.



Abbildung 4.11: Ansicht eines geöffneten Mixers der Fa. Zyklus mit 375 l Mischvolumen, Herstellerbild Fa. Zyklus

Bei der Herstellung von Hochleistungsbetonen oder keramischen Massen, bei denen eine sehr homogene Dispergierung von Feinststoffen von großer Bedeutung ist, kommen heute oftmals Intensivmischer zum Einsatz. Diese sind durch ihre Bauart darauf ausgelegt, einerseits das gesamte Mischgut, speziell auch aus den Randbereichen, immer wieder mit relativ geringem Energieeinsatz umzuwälzen, um eine hohe Homogenität zu erreichen, andererseits werden unmittelbar an den Mischwerkzeugen hohe Relativgeschwindigkeiten im Mischgut gewährleistet, wodurch eine gute Dispergierwirkung erreicht wird (vgl. Abbildung 4.12).

Die dabei erreichten sehr diffusen Strömungen im Mischer führen durch Blasen einschlüsse zu einem nennenswerten Lufteintrag in das Mischgut. Wie bereits erläutert, werden bei zunehmender Viskosität des Mischguts die entstehenden Blasen im Mischgut gehalten, da ein Entlüften durch Aufsteigen der Blasen nach dem *Stokeschen* Gesetz (Gleichung 2.6) unterbunden wird. Gleichzeitig sinkt mit der zunehmenden Viskosität die Reynold-Zahl (Gleichung 2.12), wodurch im Mischer in der Regel nur laminare Strömungszustände möglich sind. Die bei diesen Mischertypen hohen Schubspannungen nehmen nach Gleichung 2.13 mit der Viskosität weiter zu. Daher kann bei vergleichbaren Grenzflächenbedingungen mit zunehmender Viskosität in derartigen Mixern eine Reduzierung



Abbildung 4.12: Darstellung des Mischprinzips der Eirich-Intensivmischer, aus Produktinformationen der Fa. Eirich

der mittleren Blasenradien und somit eine verbesserte Dispergierung der Luft erreicht werden. Dieses ergibt sich aus den mit Gleichung 2.11 beschriebenen Zusammenhängen. Allerdings kann es mit zunehmender Viskosität auch zu einer Verminderung des Lufteintrags kommen, da der Zusammenhalt des Leims stärker ausgeprägt ist und dem Lufteintrag eine größere Kraft entgegengesetzt wird.

Sehr steife, trockene Mischungen und die damit einhergehenden hohen Schub- und Reibungskräfte im Mischgut haben neben einer verbesserten Dispergierwirkung auch eine erhebliche Erwärmung des Mischguts zur Folge. Diese Erwärmung greift in die chemischen Prozesse des Zements und der Zusatzmittel ein. Die dadurch bedingten Eigenschaftsveränderungen des Leims können je nach Ausprägung zu einer Veränderung der Luftgehalte in beide Richtungen und einer wesentlichen Verschlechterung der Verarbeitungseigenschaften führen. Deshalb ist die Steifigkeit der Leime zu begrenzen, um einen zu hohen Energieeintrag mit der damit verbundenen Erwärmung zu vermeiden.

Für zähe, klebrige oder pastöse Leime verändern sich die Strömungsverhältnisse im Mischer grundlegend. Anstelle laminarer Strömungen kommt es zu einem Anhaften des Mischguts an den Mischwerkzeugen. In diesem Fall handelt es sich eher um einen knetenden als um einen mischenden Prozess. Das Mischgut wird dabei aufgeteilt, gestaucht und wieder zusammengeführt, wofür sehr hohe Scherkräfte notwendig sind. Sowohl der Lufteintrag als auch die Dispergierwirkung fallen dabei deutlich geringer aus und auch hier erhöht sich die Temperatur des Mischguts.

Als alternative Möglichkeit für das Aufschäumen von Zementleimen bietet sich ein statisches Mischverfahren an, bei dem vorgefertigter Zementleim und Luft separat dem Misch- und Dispergiervorgang zugeführt werden. Ein Nachteil statischer Mischer liegt darin, dass bei diskontinuierlichem Betrieb zum Ende eines Mischvorgangs stets ein erheblicher Teil des Mischguts im Mischer verbleibt. Bei Verwendung für erhärtende oder verkrustende Stoffe, wie Zementleime, sind statische Mischer daher so zu planen, dass sie neben den gewünschten Dispergierfunktionen auch eine einfache Reinigung und Wartung erlauben.

Das Einbringen der Luft in die Mischung ist im Bereich der statischen Mischer vergleichsweise einfach. Soweit die Luft nicht bereits zuvor im Mischprozess in den Leim eingetragen wurde, kann sie durch einen gesonderten Zufluss separat dem Mischer zugeführt werden. Die Steuerung der Luftmenge kann dabei über den Druck oder den Querschnitt der Zuleitungen erfolgen. Dabei ist allerdings zu beachten, dass eine Druckveränderung neben dem Volumenverhältnis von Luft und Leim auch die Fließgeschwindigkeit und somit die Mischwirkung beeinflusst. Diese doppelte Abhängigkeit erschwert die zielgenaue Einstellung der Schaumeigenschaften. Wichtig für die Gleichmäßigkeit des Dispergierergebnisses ist auch die Gleichmäßigkeit der Luft- und Leimzuführung. Bei hoher Leimviskosität und einem Luftdruck oberhalb des Drucks in der Leimzufuhr kann sich eine Pfropfenströmung bilden. In diesem Fall führt eine sehr geringe Fließgeschwindigkeit des Leims zu einer vorübergehenden Verstopfung des Mischers. Im Bereich der Einleitung der Luft erhöht sich der Druck im Mischer bis auf die Höhe des Drucks in der Luftzuführung, was ein Nachfließen des Leims verhindert. Dadurch wird ein großer Teil des Mischers ausschließlich mit Luft gefüllt. Verlässt der Leimpfropfen den Mischer, strömt diese Luft schnell nach. Dadurch reduziert sich wieder der Druck im Mischer und der Leim fließt nach. Ist der Druck in der Leimzufuhr deutlich höher als der in der Luftzufuhr, kann umgekehrt ein Nachfließen der Luft unterbunden werden. Beide Fälle führen zu geringeren bzw. ungleichmäßigen Luftgehalten im Schaum. Daher sind insbesondere bei höheren Viskositäten in der Regel nur geringe Druckanpassungen zur Steuerung der Volumenverhältnisse von Leim und Luft möglich.

Die maschinellen Einflüsse auf den Mischvorgang ergeben sich, wie in Abschnitt 2.5.1 erläutert, bei diesen Mixern vor allem aus der Länge und Geometrie der Mischstrecke sowie der Einleitung von Luft und Leim. Darüber hinaus ist nach Gleichung 2.14 auch hier die Rheologie des Leims von zentraler Bedeutung für den Dispergiervorgang und die zu erreichenden Blasengrößen. Die aufzuwendende Mischenergie korreliert mit dem Fließwiderstand, den die Einbauten dem

Mischgut entgegensetzen, und schlägt sich in einem Druckverlust entlang der Mischstrecke nieder. Der Fließwiderstand nimmt mit steigender Viskosität des Mischguts zu. Da, wie bei dynamischen Mischern, die Relativbewegungen innerhalb des Mischguts und zwischen Mischgut und Mischwerkzeug (hier den festen Einbauten) für den Mischprozess ausschlaggebend sind, ergeben sich für die Strömungszustände und Wechselwirkungen mit dem Mischgut prinzipiell die gleichen physikalischen Zusammenhänge wie für Zwangsmischer beschrieben. Eine Anpassung der eingebrachten Mischenergie bei Veränderung der Fluideigenschaften kann durch eine Erhöhung des Einleitungsdrucks und somit der Fließgeschwindigkeit oder durch eine bauliche Veränderung der Mischergeometrie (Länge, Form der Einbauten) erreicht werden. Da die Mischergeometrie meist nur mit hohem Aufwand verändert werden kann, bleibt in der Regel nur eine Steuerung über eine (begrenzte) Druckanpassung. Um gute Dispergierleistungen zu erreichen, sind alle Parameter (Mischguteigenschaften, Geometrie, Druckverhältnisse) aufeinander abzustimmen. Statische Mischer können dann bei relativ geringem Energieeintrag eine sehr gute Homogenität erzielen. Auch für statische Mischer gilt, dass höherviskose kontinuierliche Phasen in verfahrenstechnisch sinnvollen Grenzen für den Druck und die Mischergeometrie keine turbulenten Strömungszustände zulassen.

Bei dynamischen Mischern können unabhängig voneinander Mischdauer, Füllgrad des Mixers und meist die Drehzahl der Mischwerkzeuge variiert werden. Daher weisen dynamische Mischer eine deutlich höhere Flexibilität bei unterschiedlichen Mischguteigenschaften auf.

Anforderungen des Aufschäumens an die Rezepturgestaltung

Die Einstellung der Viskosität muss, wie zuvor dargestellt, im Aufschäumprozess primär den drei folgenden Zielen gerecht werden:

- hinreichend hohe Viskosität, um das unmittelbare Entlüften noch während des Aufschäumprozesses zu vermeiden
- auf das Mischverfahren abgestimmte Viskosität, die eine gute Dispergierung der Luft durch die auftretenden Scherkräfte ermöglicht
- hinreichend niedrige Viskosität, um einen hohen Lufteintrag zu gewährleisten und die Erwärmung des Mischguts im Mischprozess möglichst gering zu halten

Dabei kann der Zusammenhalt der Mischung über den Wassergehalt, die Zugabe von Zusatzmitteln und, soweit es um die Ausbildung von Scherflächen bzw. die Übertragung von Scherkräften geht, über die Kornzusammensetzung beeinflusst werden. Letzteres wird an späterer Stelle separat betrachtet.

Basierend auf einer Ausgangsrezeptur können bei Anpassung der Viskosität zwei Szenarien unterschieden werden:

- eine Verringerung der Viskosität
- eine Erhöhung der Viskosität

Für eine Erhöhung der Viskosität ist vor allem der Einsatz von anorganischen oder organischen Stabilisierern geeignet. Auch eine Reduzierung des Wassergehalts kann zwar die Viskosität beeinflussen, da er jedoch, wie in Abschnitt 4.2.2 beschrieben, nach unten hin maßgeblich von den Anforderungen der Grenzflächenausbildung bestimmt wird, kann er nicht oder nur bedingt zur Erhöhung der Viskosität des Leims genutzt werden. Weitere Zusatzmittel können ebenfalls Nebenwirkungen haben, die die rheologischen Eigenschaften des Leims beeinflussen (z.B. Schaummittel). Da sie aber vorrangig entsprechend ihrer Hauptwirkung dosiert werden, sollten sie nicht zur Einstellung der Viskosität verwendet werden. Somit sind in diesem Fall die rheologischen Eigenschaften primär über die Zugabe von Stabilisierern oder, wie weiter unten geschildert, durch die gezielte Wahl einer Kornzusammensetzung einzustellen.

Bei der Wahl der Stabilisierer sind die in Abschnitt 3.2.8 dargestellten Wirkungsweisen zu berücksichtigen. Zwar sind alle Stabilisierer geeignet, die Viskosität entsprechend zu erhöhen, gleichzeitig können sich durch ihre Verwendung jedoch auch weitere Auswirkungen z.B. auf das Aufschäumverhalten oder die Schaumstabilität ergeben. Feine Silikastäube oder synthetische Kieselsäuren wirken neben ihrem Wasseranlagerungsvermögen auch durch eine Schließung von Zwickeln und eine Unterbrechung von Blutwasserkanälen. Diese Eigenschaften können sich einerseits positiv auf das Kornband auswirken, indem sie auch im Bereich der Blasenoberflächen zu einer Glättung der Feststoffstruktur beitragen (siehe Abbildung 4.13). Andererseits reduzieren sie mit zunehmender Packungsdichte der Feststoffe die Beweglichkeit der Tensid- oder Proteinmoleküle. Dadurch verlangsamen sie die Stabilisierung der neu entstehenden Blasenoberflächen und können so dem Aufschäumen entgegenwirken. Da diese sehr feinen Partikel meist als Slurry eingebracht werden, sind in der Regel zusätzliche Dispergiermittel enthalten, die weitere Einflüsse auf die Leimeigenschaften

haben können. Die Verwendung von Stabilisierern auf Silikastaubbasis ist also grundsätzlich geeignet. Insbesondere bei hohen Dosierungen und mit Blick auf Nebenwirkungen durch weitere Beimengungen ist aber eine Überprüfung der Wirkungen einzelner Produkte durch praktische Versuche im Kontext der jeweiligen Rezeptur sinnvoll.

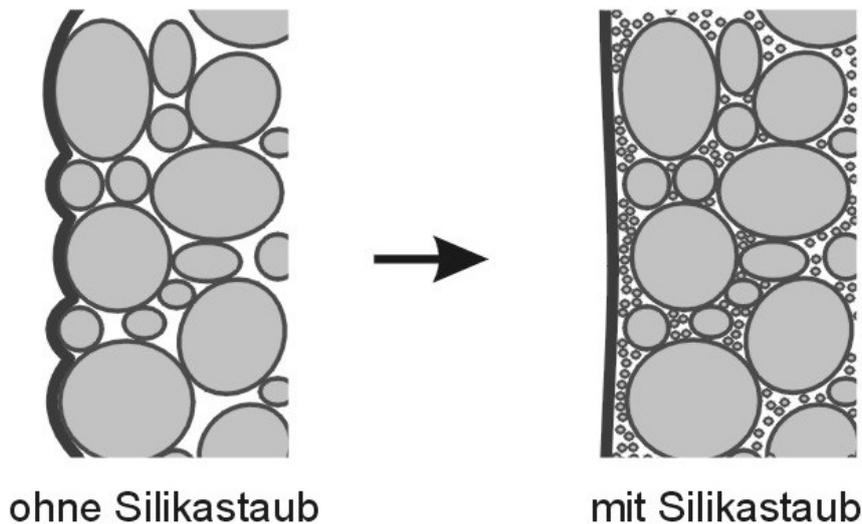


Abbildung 4.13: Glättung einer Blasenwand durch Einsatz von Silikastäuben

Bei der Verwendung organischer Stabilisierer sind, wie bereits in Abschnitt 3.2.8 beschrieben, der Molekülaufbau und die chemischen Eigenschaften der einzelnen Produkte von großer Bedeutung für die Wirksamkeit. Bei den organischen Stabilisierern, die speziell für zementgebundene Baustoffe entwickelt wurden, ist davon auszugehen, dass sie ausreichend unempfindlich gegen hohe pH-Werte und hohe Ionen-Konzentrationen sind. Durch die polaren Gruppen der Stabilisierermoleküle können aber Wechselwirkungen mit anderen Stoffen auftreten. Angesichts der vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten der Stabilisierermoleküle durch Polymerisation oder Substitution bei unterschiedlichen Ausgangsmolekülen sind allgemeine Aussagen zu derartigen Nebenwirkungen nicht möglich. Ausgehend von den grundsätzlichen Wirkmechanismen der organischen Stabilisierer, die als relativ große Makromoleküle in der flüssigen Phase des Leims vorliegen und Wassermoleküle binden, sind sie für die Verwendung in aufgeschäumten Leimen als gut geeignet einzustufen. Durch ihre gestreckte Molekülstruktur mit einer Haupt- und zahlreichen Seitenketten weisen sie eine hohe geometrische Anpassungsfähigkeit auf. Dadurch sind keine unmittelbaren Beeinflussungen z.B. der Form der Porenwänden zu erwarten (Abbildung 4.14). Nachteilig wirken sich die großen, z.T. miteinander verzahnten Moleküle möglicherweise auf die Mobilität der Tensid- oder Proteinmoleküle aus. Hier kann

es einerseits zu direkten Interaktionen zwischen den Molekülen kommen, andererseits kann die räumliche Ausdehnung der Stabilisierermoleküle den Weg der Tensid- bzw. Proteinmoleküle zu frisch gebildeten Blasenoberflächen durch sterischer Hinderung verlängern und so die Blasenstabilisierung verzögern. Verglichen mit dem ähnlichen, sich durch Feststoffpartikel ergebenden Effekt ist zu erwarten, dass der negative Einfluss der organischen Stabilisierer wegen der weniger kompakten Struktur der Molekülagglomerationen schwächer ausgeprägt ist.

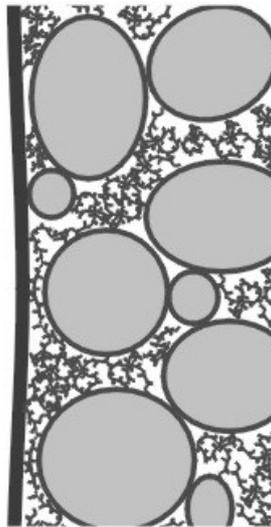


Abbildung 4.14: Organische Stabilisierer bewirken Netzstrukturen in der flüssigen Phase, die die Beweglichkeit von Wassermolekülen reduzieren (schematische Darstellung)

Zur Verringerung der Viskosität eignet sich eine Erhöhung des Wassergehalts der Rezeptur sowie die Zugabe von Betonverflüssigern bzw. Fließmitteln. Bei der Erhöhung des Wassergehalts sind in der Regel keine Nachteile für das Aufschäumen des Leims zu erwarten, wohl aber die bereits dargestellten negativen Auswirkungen auf den erhärteten Leim sowie die in den Abschnitten 4.2.4 und 4.2.5 beschriebenen ungünstigen Einflüsse auf die Stabilität des frischen und erhärtenden Zementschaums. Aus diesem Grund ist eine Erhöhung des Wassergehalts der Rezeptur zur Verringerung der Viskosität nur in geringem Umfang ratsam. Stattdessen empfiehlt sich die Verwendung von Betonverflüssigern oder Fließmitteln. Von den in Abschnitt 3.2.6 genannten Wirkmechanismen sind die, die deutlich verzögernd in den Hydratationsprozess eingreifen wegen ihrer nachteiligen Auswirkungen auf die Ansteif- und Erhärtungsphase (Abschnitt 4.2.5) zu vermeiden. Angesichts erheblicher Zugabemengen grenzflächenaktiver Stoffe zur Schaumstabilisierung ist auch die Veränderung der Oberflächenspannung des Wassers durch die Fließmittel oder Betonverflüssiger von untergeordneter

Bedeutung. Verflüssigende Wirkungen auf Grundlage von sterischen Effekten, durch die Ausbildung von „Gleitfilmen“ um die Feststoffpartikel sowie die Auflösung von Flockungserscheinungen lassen hingegen keine grundsätzlich nachteiligen Auswirkungen auf die Herstellung der Zementschäume erwarten. Grundlage für die meisten dieser Wirkmechanismen, einschließlich der elektrostatischen Abstoßung zwischen feinen Partikeln, ist die Veränderung von Oberflächenladungen durch Adsorption der Verflüssigermoleküle an den Feststoffen. Dieser massive Eingriff in die Ladungsverteilungen an den Feststoffoberflächen birgt ein erhebliches Potential für Wechselwirkungen mit anderen Zusatzmitteln, wie organischen Stabilisierern oder Schaummitteln bzw. Luftporenbildnern. Diese Wechselwirkungen können aber auf theoretischer Basis derzeit weder qualitativ noch quantitativ abgeschätzt werden. Da insbesondere die sterischen Effekte der Fließmittel auf Basis von Polycarboxylaten nicht primär auf elektrostatischen Einflüssen beruhen, erscheinen diese für die Herstellung aufgeschäumter Zementleime besonders geeignet. Durch ihre Nutzung können die ungünstigen Wirkmechanismen der Fließmittel bei gleicher Wirksamkeit reduziert werden.

Der Einfluss der Kornzusammensetzung auf das rheologische Verhalten von Leimen wird durch drei Faktoren bestimmt. Diese sind die geometrischen Eigenschaften der Korngrößenverteilung und der Kornform sowie die Intensität von Oberflächenladungen, die zu interpartikulären Kräften und Feststoff-Zusatzmittel-Interaktionen führen.

Korngrößenverteilung und Kornform beeinflussen die Packungsdichte und die innere Oberfläche eines Kornhaufwerks sowie den davon abhängigen Wasseranspruch. In Abschnitt 4.2.2 ist dargestellt, dass zu Herstellung von Zementschäumen ein Wassergehalt oberhalb des Sättigungspunktes erforderlich ist. Der Sättigungspunkt kann entsprechend den Erläuterungen in Abschnitt 3.1 als Kennwert für den Wasseranspruch des Kornhaufwerks betrachtet werden. Zur Optimierung der Zementsteineigenschaften (vgl. Abschnitte 4.2.4 und 4.2.5) ist der absolute Wassergehalt möglichst gering zu halten, woraus sich die Vorgabe eines geringen Wasseranspruchs des verwendeten Kornhaufwerks ableiten lässt. Dieser kann durch glatte Kornoberflächen (Oberflächenminimierung) und eine hohe Packungsdichte (Zwickelminimierung) erreicht werden. Somit kann durch Veränderung der Kornzusammensetzung (Art und Volumenanteile) bei konstantem Wassergehalt über die korrespondierende Veränderung des Wasseranspruchs ein Effekt auf die rheologischen Eigenschaften des Leims erreicht werden. Zur Feinabstimmung der rheologischen Eigenschaften wird jedoch in der Regel der einfachere, umgekehrte Weg eingeschlagen, dass der Wassergehalt an

den Wasseranspruch des Kornaufwerks angepasst wird. Bei der anfänglichen Rezeptentwicklung sind die Parameter Packungsdichte und Kornform jedoch zu berücksichtigen, um von vorne herein niedrige Wassergehalte zu ermöglichen. Auch bei vergleichbaren Packungsdichten beeinflusst die Korngrößenverteilung jedoch noch über einen weiteren Effekt das rheologische Verhalten des Zementleims (vgl. Abschnitt 3.2.1). Wie Abbildung 4.15 veranschaulicht, können Ausfallkörnungen zu einer ausgeprägten Verzahnung der groben Körner im Korngerüst führen (linkes Teilbild). Dieses vergrößert die erforderlichen Kräfte zur Ausbildung von Scherflächen im Leim und erhöht daher seine Viskosität. Bei einer ausgewogenen Korngrößenverteilung (rechtes Teilbild) erfordert die Ausbildung von Scherflächen nur vergleichsweise kleine Scherkräfte, was zu einer geringeren Viskosität führt.

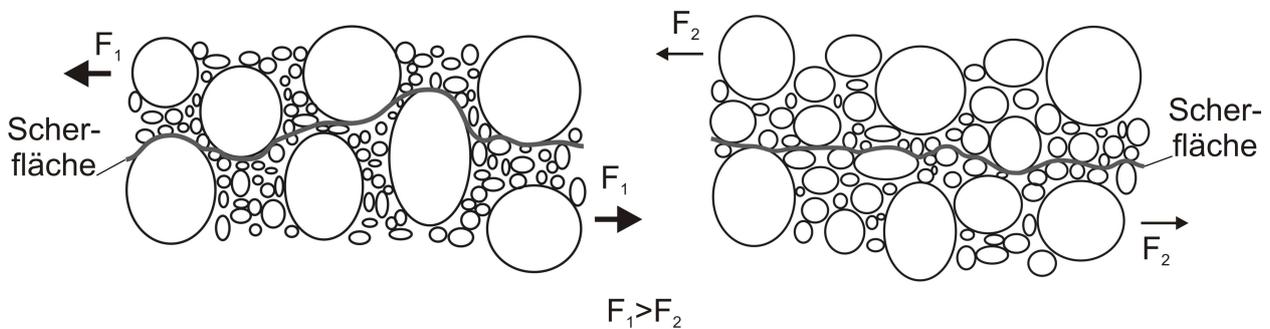


Abbildung 4.15: Ausbildung von Scherflächen bei unterschiedlichen Korngrößenverteilungen

Eine weitere Möglichkeit, die Viskosität durch die Wahl der verwendeten Feststoffe zu beeinflussen, liegt in der Kornform. Diese ist in der Regel stoffspezifisch, so dass sie vorwiegend durch die Veränderung der Art der Ausgangsstoffe variiert werden kann. Stoffe innerhalb einer Stoffgruppe (gleichartige Zemente, Flugaschen, Kalksteinmehle, etc.) weisen hinsichtlich der Kornform meist Ähnlichkeiten auf. Daher hat der Austausch von Stoffen innerhalb einer Stoffgruppe, z.B. der Wechsel der Flugascheart, meist einen relativ geringeren Einfluss. Grundlegende Veränderungen des Feststoffgemischs, wie z.B. der Wechsel der Zementart oder die Wahl eines anderen Zusatzstoffes haben dagegen einen deutlichen kornformabhängigen Einfluss auf die Viskosität. Als unterschiedliche Zusatzstoffe kommen nach Abschnitt 3.2 Flugaschen, Gesteinsmehle (z.B. Kalksteinmehl oder Quarzmehl) sowie Silikastäube in Frage. Wie schon in 3.2.4 erläutert, haben Gesteinsmehle eine sehr rauhe Oberfläche, die einerseits zu einer Vergrößerung des Verhältnisses zwischen Oberfläche und Volumen und somit zu einem erhöhten Wasseranspruch führt, andererseits aber auch eine Verzahnung der Feststoffpartikel begünstigt und ein Abgleiten der Partikel

übereinander erschwert. Beides führt tendenziell zu einer höheren Viskosität des Leims. Flugaschen und Silikastäube haben herstellungsbedingt eine relativ runde Form und glatte Oberflächen, die einen „Kugellagereffekt“ bewirken und Schervorgänge begünstigen. Daher werden Viskosität und Fließgrenze der Leime durch diese Partikel formbedingt eher verringert. Insbesondere bei den feinen Silikastäuben mit großer Oberfläche wird dieser Effekt allerdings durch das Wasserbindevermögen überlagert, so dass ihre Zugabe insgesamt meist nicht zu einer Reduzierung der Viskosität führt.

Eine Veränderung des Zusatzstoffes stellt in allen Fällen einen erheblichen Eingriff in die Rezeptur dar, da nicht nur Einflüsse aus der Kornform zu erwarten sind. Durch eine gleichzeitige Veränderung der Korngrößenverteilung oder das Einbringen von ausgeprägten Oberflächenladungen bei Gesteinsmehlen können physikalische und chemische Leimeigenschaften nennenswert beeinflusst werden. Daher ist die Wahl des Zusatzstoffes bei der Rezepturentwicklung zu bedenken. Eine Rezepturoptimierung durch Austausch von Zusatzstoffen ohne weitere Rezepturanpassung wird in der Regel nicht zielführend sein.

Da sich die Wahl der Feststoffe primär auf das Verhalten der Leimphase auswirkt und nur indirekt über den Wasseranspruch auf die Eigenschaften der Zementschäume, reicht es in der ersten Phase der Rezepturentwicklung zunächst aus, die in Abschnitt 3.2 beschriebenen und aus der Literatur bekannten pauschalierten Einflüsse der unterschiedlichen Feststoffe zu berücksichtigen. Ergeben sich in der praktischen Anwendung im Einzelfall abweichende Einflüsse, z.B. durch Wechselwirkungen mit den z.T. hochdosierten Zusatzmitteln, können diese auf Grundlage der zuvor beschriebenen Einzeleffekte analysiert werden, um dann gezielt eine Veränderung der Feststoffzusammensetzung vorzunehmen.

4.2.4 Stabilität der frischen Zementschäume bis zum Erstarren

Entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften des erhärteten Zementleims als Endprodukt hat neben der Herstellung auch die Phase zwischen der Verarbeitung und dem Erstarren des Leims. In diesem Zeitfenster wirken sowohl die in Kapitel 2 erläuterten physikalischen und grenzflächen-chemischen Einflüsse als auch die chemischen Veränderungen aus der Hydratation des Zements und ggf. weiteren chemischen Reaktionen im Leim auf das sensible System Zementschaum. Diese prägen maßgeblich die Porenstruktur, die ihrerseits die Eigenschaften und Funktionalität des erhärteten Zementschaums bestimmt.

Jeder Schaum auf Fluidbasis unterliegt Zerfallsprozessen. Dieses gilt, so lange die Stabilität der Schaumstruktur vom Gleichgewicht zwischen den Einwirkungen auf die Blasenwänden und deren Widerstand abhängt. Der Veränderungsprozess der Porenstruktur wird bei Zementschäumen erst gestoppt, wenn der Zementleim so weit erstarrt ist, dass er eine eigenständige feste Tragstruktur bildet und keine fluiden Verformungen der Blasenwänden mehr zulässt. Der Erstarrungsvorgang kann sich über einen Zeitraum von wenigen Stunden bis hin zu mehreren Tagen erstrecken, was von der Geschwindigkeit und Intensität des Hydratationsprozesses abhängt.

Im Weiteren werden die wesentlichen schaumzerstörenden Mechanismen angesprochen und Möglichkeiten dargestellt wie diesen mit Mitteln der Rezepturentwicklung entgegengewirkt werden kann. Im Anschluss daran erfolgt eine Übersicht über die möglichen Auswirkungen auf die Porenstruktur, die sich je nach Art, Fortschritt und zeitlicher Abfolge der Zerfallsprozesse einstellen.

Koaleszenz

Wie bereits in den Grundlagen der Schaumtechnologie erläutert, streben flüssige Schäume einen Zustand minimaler (Grenzflächen-)Energie an. Diese wird bei vollständiger Trennung von flüssiger und gasförmiger Phase erreicht. Die dazu erforderlichen Stofftransporte lassen sich unterscheiden in:

- Blasenbewegungen
- Drainage

Blasenbewegungen treten immer dann auf, wenn den Auftriebskräften einer Blase keine gleich großen oder größeren Kräfte entgegenwirken. Für Blasen die weiträumig von einem (homogenen) Fluid umgeben sind, ergeben sich diese dem Auftrieb entgegenwirkenden Kräfte nach Gleichung 2.6 aus der Reibung beim Umfließen der Blase, abhängig von der Viskosität des Leims, sowie ggf. entsprechend den Schilderungen in Abschnitt 2.4.1 aus einer zusätzlichen Kraft in Abhängigkeit von der Fließgrenze des Leims. Bei steigenden Luftgehalten kommt es im Bereich der Kugelschäume zu einer strukturellen Veränderung. Während in Blasensystemen der kontinuierlichen Phase die Aufgabe der Stabilisierung des Systems und des Lastabtrags zukommt und die Blasen sich lediglich über ihren Innendruck selbst stabilisieren, tragen in Kugelschäumen die Blasen

unmittelbar zur Stabilisierung des Schaums bei. Sie stützen dabei durch ihren Innendruck und die Grenzflächenspannungen die nur noch dünnen Fluidlamellen zwischen den Blasen. Verschieben sich die Volumenverhältnisse zwischen kontinuierlicher und disperser Phase so weit, dass die Lamellendicken in gleicher Größenordnung oder dünner sind als die Blasendurchmesser, erfordert das Aufsteigen einer einzelnen Blase die Verschiebung oder Verformung angrenzender Blasen (vgl. Abbildung 4.16).

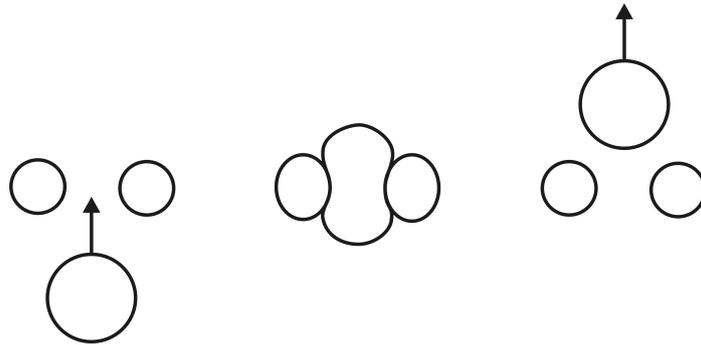


Abbildung 4.16: Schematische Darstellung der Blasenverformung bei Aufsteigen einzelner Blasen durch Auftriebskraft

Die für diese Verformungen nötigen Kräfte müssen zusätzlich zu den bereits beschriebenen leimabhängigen Kräften aus der Auftriebskraft aufgebracht werden bzw. wirken dieser ebenfalls entgegen. Sie sind von der Leimviskosität und den Kapillardrücken der beteiligten Blasen abhängig. Durch die ausgeprägte Viskosität von Zementleimen wird das Aufsteigen von Blasen daher auch in Kugelschäumen mit hohem Luftgehalt wirkungsvoll unterdrückt. Deshalb spielen Blasenbewegungen, die unmittelbar zu einem Aufsteigen der Blasen aus dem Inneren an die Leimoberfläche führen, in Kugelschäumen aus Zementleim normalerweise keine Rolle. Treten dennoch derartige Effekte auf, z.B. gefördert durch Erschütterungen von außen, kann diesen durch eine gezielte weitere Erhöhung der Viskosität entgegengewirkt werden. Dazu bietet sich wie zuvor schon beschrieben der Einsatz von Stabilisierern und insbesondere von organischen Stabilisierern an. Ein Entlüften durch Blasenbewegung kann so weitgehend ausgeschlossen werden.

Der Druck auf eine Schaumlamelle, der sich aus der Auftriebskraft der darunter befindlichen Blase ergibt, kann jedoch zu einer Verdrängung des Leims aus der Lamelle und so zu deren weiterer Ausdünnung und Schwächung führen. In der Folge kann es zum Reißen der Lamelle und somit zur Blasenkoaleszenz kommen (vgl. Abbildung 4.17).

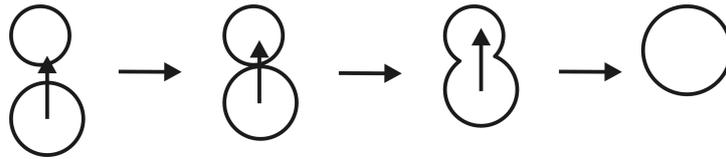


Abbildung 4.17: Schematische Darstellung der Annäherung und Koaleszenz zweier Blasen durch Auftriebskraft

Die durch Auftrieb bedingte Verdrängung der Leimphase zwischen den Blasen überlagert sich mit dem in 2.4.1 beschriebenen Drainageeffekt, der das Abfließen des Leims zwischen den Blasen unter Schwerkrafteinwirkung beschreibt. Die Drainage ist das Pendant zur Blasenbewegung, wenn die Struktur des Schaums, wie bei leichten Kugel- und Polyederschäumen, vorwiegend durch eine dichte und daher unbewegliche Blasenpackung vorgegeben ist und Relativbewegungen zwischen flüssiger Phase und Gasphase daher primär in der flüssigen Phase erfolgen. Bei sehr dünnen Lamellen spielen für die Drainage neben den Gravitationskräften auch noch Kapillarkräfte eine Rolle. Der Drainageprozess findet bei jedem Schaum über den gesamten Querschnitt statt. Seine Auswirkungen lassen sich jedoch vor allem im oberen und unteren Teil des Schaums erkennen, da sich im mittleren Bereich des Schaums der Zufluss von oben und der Abfluss nach unten ausgleichen (vgl. Abbildung 4.18). Auch die Drainage führt von oben nach unten zu einer Ausdünnung der Schaumlamellen und entsprechend zu einer Annäherung der Blasen bis hin zur Koaleszenz.

Da die Koaleszenz eine direkte, zwangsläufige Folge einer zu starken Ausdünnung der Lamellen ist, kann sie durch eine Verlangsamung der Blasenannäherung bzw. Drainage reduziert werden. Möglichkeiten um dieses zu erreichen sind wie in Abschnitten 2.3 und 2.4.2 erläutert:

- Einsatz von Elektrolyten zur Herstellung von elektrischen Doppelschichten in den Lamellen
- Einsatz organischer Verbindungen zur Verbesserung des Besatzes der Grenzflächen mit grenzflächenaktiven Stoffen
- Einbau von teilweise benetzten Feststoffpartikeln in die Blasenhülle
- Einsatz von Polymeren oder Flüssigkeitskristallen zur Erhöhung der Viskosität der flüssigen Phase
- Wahl grenzflächenaktiver Stoffe mit einer starken blasenstabilisierenden Wirkung



Abbildung 4.18: Auswirkungen der Drainage auf den Zementschaum - oben: Schaumzerfall, mitte: stabiler Zementschaum, unten: dichter Zementstein aus abgesetztem Zementleim

Darüber hinaus ergeben sich betontechnologische Möglichkeiten zur Reduzierung der Drainage. Diese liegen einerseits in der Wahl einer Kornzusammensetzung mit hohem Wasserrückhaltevermögen und andererseits in dem Einsatz von Fließmitteln, die eine ausgeprägte Wasserfilmbildung um die Feststoffe fördern.

Die erstgenannten und in den Grundlagen der Schaumtechnologie beschriebenen Verfahren der Schaumstabilisierung wurden bei wässrigen Schäumen mit einfacher chemischer Zusammensetzung (Wasser + Tensid) beobachtet. Zementleime haben, wie schon mehrfach erwähnt, eine sehr komplexe, zeitlich veränderliche und nicht genau bestimmte chemische Zusammensetzung. Insbesondere die Zugabe elektrochemisch wirkender Additive kann in ihrer Wirkung nicht theoretisch abgeschätzt werden, da die einfachen Modelle nicht die Einflüsse der im Zementleim allgegenwärtigen unterschiedlichen reaktiven Moleküle und Ionen berücksichtigen können. Hier ist mit Wechselwirkungen zu rechnen, die zu Veränderungen der Wirkintensität bis hin zu gänzlich anderen Wirkungen führen können.

Eine Stabilisierung der Schäume durch explizite Zugabe von Elektrolyten ist daher nicht sinnvoll. Elektrolyte liegen einerseits bereits in erheblichem Umfang im Zementleim vor, andererseits führt die große Anzahl unterschiedlich geladener Teilchen im Leim dazu, dass zusätzlich zugegebene Elektrolyte nicht primär

zu einer Stabilisierung der Blasenwänden beitragen, sondern an unterschiedlichen Molekülen oder Oberflächen angelagert werden und ggf. weitere Veränderungen der Ladungsverteilungen und somit der elektrochemischen Vorgänge hervorrufen können.

Ähnliche Probleme sind auch bei der Anwendung von organischen Verbindungen zur Verbesserung des Besatzes der Grenzflächen mit grenzflächenaktiven Stoffen zu erwarten. Auch diese tragen Ladungen, die zwar auf die verwendeten Tenside abgestimmt sein müssen, jedoch auch Wechselwirkungen mit anderen Ionen oder Molekülen unterliegen. Darüber hinaus sind organische Verbindungen meist anfällig gegenüber den in Zementleimen vorherrschenden hohen pH-Werten. Diese können die stabilisierende Wirkung auf den Schaum verringern oder aufheben. Bei der Entwicklung bzw. Formulierung von Schaumbildnern ist es üblich, unterschiedliche Wirkstofftypen (unterschiedliche Tenside oder Proteine) miteinander zu kombinieren. Dabei können ggf. auch weitere Stoffe wie ausgesuchte organische Verbindungen etc. nach eingehender Prüfung zugegeben werden, um die Wirkung zu optimieren. Eine Feinabstimmung der Schaumbildner auf die veränderten Anforderungen für aufgeschäumte Zementleime stellt somit ein Optimierungspotential dar, bedarf jedoch des Know-hows der Zusatzmittelforschung. Eine gesonderte Zugabe von organischen Verbindungen ohne die spezifische Abstimmung auf die Wirkstoffe im verwendeten Schaummittel lassen keine systematischen Verbesserungen der Schaumstabilität erwarten.

Der Einbau von Feststoffpartikeln in die Blasenwänden ergibt sich zwangsläufig bei Verwendung von Zementleimen (Feststoffsuspension) als kontinuierliche Phase des Schaums. Dabei ist das Benetzungsverhalten der Feststoffpartikel nach Gleichung 2.10 (Abschnitt 2.4.2) vom Verhältnis der Grenzflächenspannungen zwischen der festen, flüssigen und gasförmigen Phase abhängig. Grundsätzlich wirkt sich ein ausgeprägtes Benetzungsverhalten positiv auf die Schaumstabilität aus, da es zu einer verstärkten Ausbildung von Wasserhüllen um die Feststoffe führt und dadurch einerseits die Bindung des freien Wassers an die Feststoffe erhöht und andererseits zu einem glatten und geschlossenen Wasserfilm an den Porengrenzflächen führt. Entsprechend ungünstig ist ein schwaches Benetzungsverhalten von Feststoffen. Generell kann das Verhältnis der Grenzflächenspannungen in Zementleimen nicht beziffert werden, da die chemische Zusammensetzung nicht genau bekannt ist und sich durch Reaktionen zwischen den Stoffen mit der Zeit verändert. So liegen in der flüssigen Phase in Abhängigkeit von den Ausgangsstoffen des Zementleims unterschiedliche gelöste Stoffe vor, die die Grenzflächenspannung erheblich beeinflussen. Teile der Fest-

stoffoberflächen unterliegen ebenfalls einer fortschreitenden Veränderung, wie sie z.B. bei der Hydratation von Zementkörnern auftritt. Daher ist eine Vorhersage des Benetzungsverhaltens bestimmter Feststoffe nicht sicher möglich. Da Grenzflächenspannungen und somit auch die für das Benetzungsverhalten charakteristischen Kontraktwinkel sehr sensibel auf grenzflächenaktive Stoffe reagieren, kann in der praktischen Anwendung die Zugabe zusätzlicher Stoffe dazu führen, dass die Schaumstabilität wesentlich erhöht oder vermindert wird. Bei diesen Stoffen kann es sich um reguläre Ausgangsstoffe wie Zemente, Zusatzstoffe, Zusatzmittel etc. oder auch um Verunreinigungen (schon in kleinen Mengen) handeln. Dabei ist zu beachten, dass dieser Effekt stets durch das Zusammenspiel der verwendeten Stoffe bestimmt wird. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass die Veränderungen des Benetzungsverhaltens von Stoffen begrenzt ist. Daher werden Stoffe, die in einem Zementleim ein sehr ausgeprägtes benetzendes Verhalten aufweisen, dieses unabhängig von der spezifischen Zusammensetzung auch in anderen Zementleimen behalten und daher stets die Schaumstabilität fördern. Umgekehrt ist anzunehmen, dass Stoffe mit sehr schwachem Benetzungsverhalten stets zur Destabilisierung neigen. Bei nicht-porösen Feststoffen, die unabhängig von ihrer Partikelgröße ein hohes Wasserbindevermögen bzw. einen hohen Wasseranspruch haben, kann tendenziell von einem guten benetzenden Verhalten ausgegangen werden. Allerdings sind bei dieser groben Klassifizierung wiederum Wechselwirkungen mit anderen Stoffen, wie z.B. Fließmitteln, zu beachten, da diese z.T. gezielt auf das Benetzungsverhalten einwirken.

Diese gezielte Beeinflussung des Benetzungsverhaltens durch Fließmittel stellt eine weitere Möglichkeit der Schaumstabilisierung dar. Insbesondere Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatethern (PCE) neigen dazu, ausgeprägte Wasserfilme um die Feststoffe (vorwiegend Zementkörner) zu bilden. Das ist in ihrer Struktur mit Haupt- und Nebenketten und der Fähigkeit, sich an Feststoffe anzulagern und gleichzeitig Wassermoleküle zu binden (vgl. Abschnitt 3.2.6), begründet. In diesen relativ dicken Wasserfilmen werden in erheblichem Umfang Wassermoleküle an die Feststoffe gebunden, so dass sie in ihrer Beweglichkeit eingeschränkt sind. Dadurch sind sie für die Drainage weniger anfällig und verringern zusätzlich die Fließquerschnitte für das ungebundene Wasser. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 4.19 schematisch dargestellt.

Der Einsatz von Polymeren zur Erhöhung der Viskosität der flüssigen Phase stellt eine in der Betontechnologie bekannte Vorgehensweise dar. Entsprechende Polymere sind in Form der bereits mehrfach erwähnten organischen Stabi-

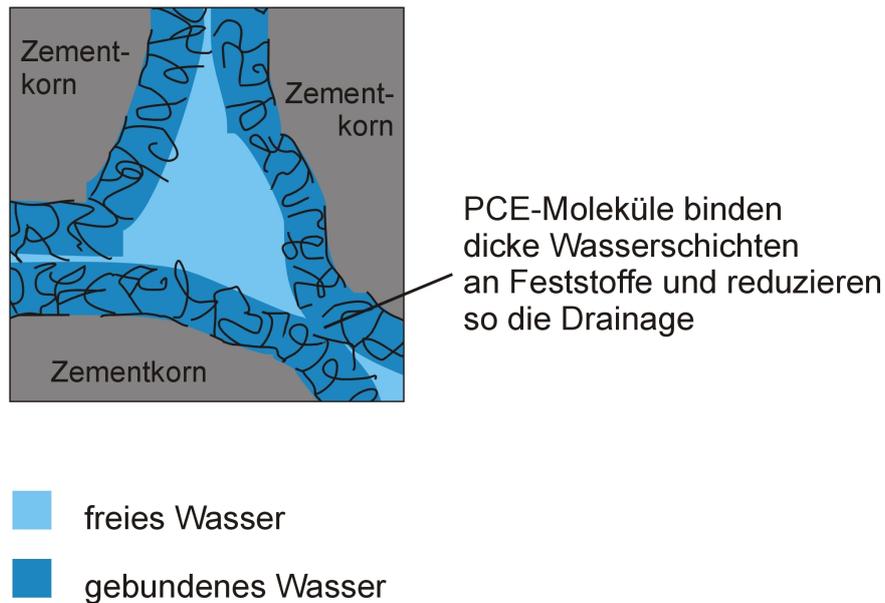


Abbildung 4.19: Reduzierte Drainage durch PCE-beeinflusste Wasseranlagerung an Feststoffe

lisierer als Zusatzmittel für zementgebundene Baustoffe verfügbar. Wie schon erläutert, hemmen sie durch Wasseranlagerung und Vernetzung die Beweglichkeit der Wassermoleküle und reduzieren so die Drainage (Abbildung 4.20).

Organische Stabilisierer wirken sich nicht nur in dieser Phase der Stabilisierung des frischen Schaums aus, sondern wie schon erwähnt auch in der Herstellungsphase des Schaums. Auf Grund dieser Wirkungen in den unterschiedlichen Phasen der Zementschaumherstellung sind allerdings bei der Dosierung alle sich ergebenden Einflüsse zu berücksichtigen und gegen einander abzuwägen. Dadurch wird der Handlungsspielraum zur gezielten Beeinflussung eines einzelnen Aspektes der Schaumherstellung eingengt. Durch die große Variationsmöglichkeit bei der Herstellung von organischen Stabilisierern (vgl. Abschnitt 3.2.8) besteht allerdings theoretisch die Möglichkeit, organische Stabilisierer herzustellen, die gezielt in bestimmten Phasen oder auf bestimmte rheologische Eigenschaften des Leims wirken. Dieses erfordert allerdings spezifische Produktentwicklungen oder -anpassungen durch die Zusatzmittelhersteller, die derzeit nicht absehbar sind. Gegenwärtig ist also bei dem Einsatz von organischen Stabilisierern zur Stabilisierung des frischen Schaums eine Dosierung auf Grundlage von Versuchen unter Einbeziehung aller Auswirkungen in den unterschiedlichen Herstellungsphasen erforderlich. Nachteilig wirken sich die organischen Stabilisierer insbesondere bei hohen Dosierungen auf den Ablauf des Hydratationsprozesses aus. Sie führen mitunter zu einer erheblichen Verzögerung oder Verlangsamung der chemischen Reaktionen. Dadurch verlängert sich die Zeit, die der Leim zum

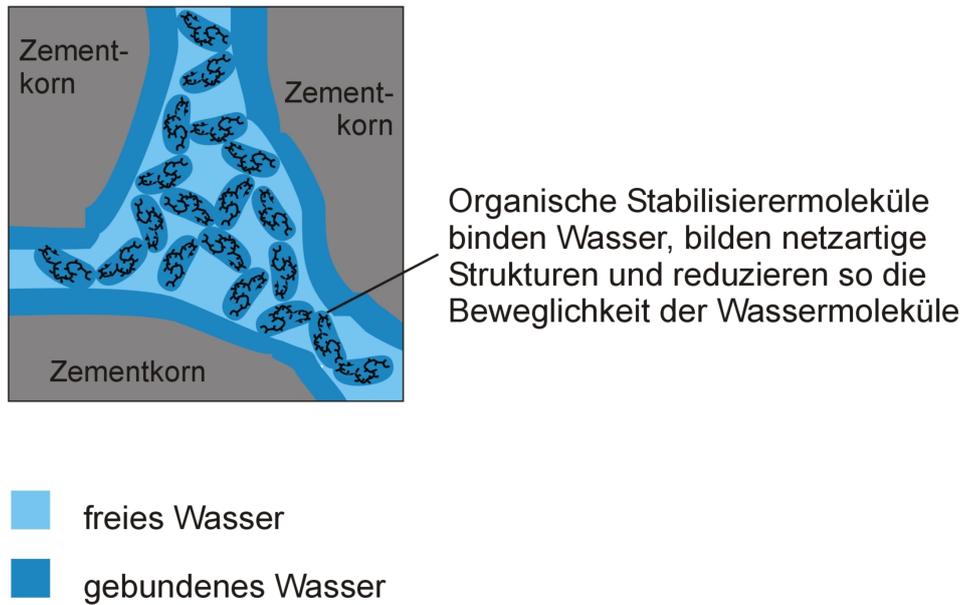


Abbildung 4.20: Reduzierte Drainage durch eingeschränkte Mobilität von Molekülagglomeraten aus Wasser und organischen Stabilisierern

Ansteifen benötigt. Dementsprechend verlängert sich auch die Zeitspanne, in der es zu Drainageeffekten kommt. Daher ist bei der Verwendung der organischen Stabilisierer, vor allem in Verbindung mit weiteren, verzögernd wirkenden Zusatzmitteln, auf eine genügend ausgeprägte Anfangserhärtung zu achten. Diese kann in der Regel durch einen ausreichend hohen Portlandzementklinkeranteil in dem verwendeten Zement erreicht werden. Andernfalls kann es bei der Verwendung von organischen Stabilisierern trotz deutlicher Verlangsamung der Drainage durch ihr längeres Anhalten zu gleichbleibenden oder sogar schlechteren Ergebnissen hinsichtlich der Schaumstabilität kommen.

Auch die Auswahl der Schaummittel hat einen erheblichen Einfluss auf die Stabilisierung der Blasen im frischen Zementschaum. Hier sind zunächst die in Abschnitt 2.4.2 erläuterten, stabilisierenden Einflüsse auf die Schaumlamellen zu nennen, wie Disjoining Pressure, Marangoni-Effekt und Gibbs-Effekt. Diese hängen maßgeblich von der Polarität und Größe der Moleküle ab. Daher ergeben sich wesentliche Unterschiede vor allem zwischen Schaumbildnern auf Tensid- und auf Proteinbasis (vgl. Tabelle 2.1), die auf dem ganz unterschiedlichen Molekülaufbau und Adsorptionsverhalten der Stoffe basieren. Diese grundlegenden Eigenschaften von Proteinen und Tensiden in wässrigen Schäumen sind auf die Verwendung in Zementleimen übertragbar. Das gilt zumindest für solche Produkte, die generell für den Gebrauch in Betonen und Zementleimen geeignet sind. Somit kann davon ausgegangen werden, dass Schäume bei Verwendung

von Proteinschaumbildnern im Allgemeinen stabiler sind als bei Verwendung von Tensiden, da die Adsorption der Proteinmoleküle an der Blasenoberfläche irreversibel ist und die Molekülgröße zu einer deutlich stärkeren Filmdicke an der Grenzfläche führt. Sie neigen dazu, die Blasen durch räumliche Vernetzung ihrer Moleküle gleichsam einzuhüllen und somit gegen äußere Einflüsse, insbesondere auch Scherkräfte, unempfindlicher zu machen. Dieser geschlossene, dicke Film um die Blasen erschwert gleichzeitig eine dichte Annäherung der Blasen aneinander und reduziert so die Koaleszenz durch sterische und elektrostatische Abstoßung deutlich eher und effektiver als dies durch den Disjoinig Pressure bei Tensiden der Fall ist (vgl. Abbildung 4.21). Daher wirken Proteine insgesamt stärker stabilisierend. Der hohe pH-Wert in den Zementleimen kann allerdings zu Problemen führen, da er ggf. einen sukzessiven Zerfall der Proteine hervorruft. Im frischen Schaum ist dadurch eine Beeinträchtigung der stabilisierenden Wirkung möglich.

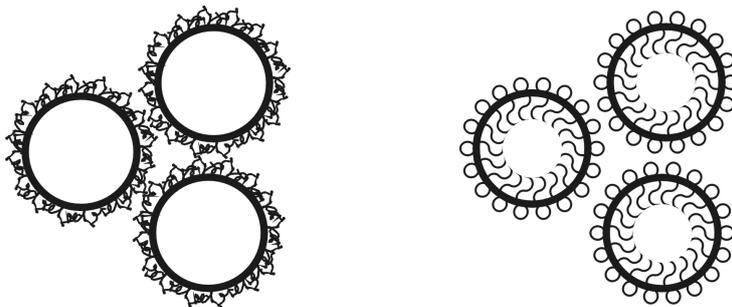


Abbildung 4.21: Modell für die Ausbildung der Blasenoberflächen mit Protein- (links) und Tensidschaumbildnern (rechts)

Sowohl für Tenside als auch Proteine gilt, dass die Dichte des Grenzflächenbesatzes für die Stabilität der Blasenwandungen entscheidend ist. Da der Grenzflächenbesatz unter anderem von der Konzentration des grenzflächenaktiven Stoffes in der flüssigen Phase abhängt, kann allgemein mit steigender Schaummitteldosierung auch eine zunehmende Stabilität des Schaums vorausgesetzt werden. Verstärkt wird diese stabilisierende Wirkung hoher Schaummittelkonzentrationen durch eine ebenfalls mit der Dosierung zunehmende Zähigkeit des Leims. Weiterhin ist insbesondere bei hohen Tensidkonzentrationen mit einer ausgeprägten Mizellbildung zu rechnen. Dabei möglicherweise entstehende große, räumliche Mizellstrukturen können auch zu einer Zunahme der Zähigkeit der flüssigen Phase führen (vgl. Abschnitt 2.3.1). Im Gegensatz dazu steht allerdings, wie bereits bei den organischen Stabilisierern, gerade bei hohen Schaummittelkonzentrationen eine zunehmende Verzögerung der Hydratation und des Ansteifens des Zementleims. Dadurch wird das Zeitfenster in dem

Drainage auftritt ausgeweitet, was sich wiederum negativ auf die Schaumstabilität auswirkt. Auch hier kann diesem Effekt durch einen ausreichenden Anteil Portlandzementklinker im Zementleim entgegengewirkt werden.

Hinsichtlich einer Optimierung der Kornzusammensetzung, mit Blick auf die Stabilisierung der Blasen und Verminderung der Drainage oder Blasenbewegungen, ist an dieser Stelle nochmals auf die Ausführungen in Abschnitt 4.2.3 verwiesen. Danach ist die Kornzusammensetzung primär unter Gesichtspunkten der Schaumherstellung (Aufschäumen) festzulegen. Stabilitätsfördernde Effekte können in dieser Phase des Schaums durch ein ausgeprägtes Wasserrückhaltevermögen erreicht werden. Dieses erfordert jedoch eine hohe Packungsdichte der Feststoffe mit relativ geringen Flüssigkeitsanteilen knapp unter dem Sättigungspunkt (vgl. Abschnitt 3.1). Das steht im Widerspruch zu den Erfordernissen der Schaumherstellung und bietet daher keine praktikable Möglichkeit zur Schaumstabilisierung.

Unabhängig von dem Wasserrückhaltevermögen des Kornhaufwerks ist bei der Wahl der Kornzusammensetzung darauf zu achten, dass keine Ausfallkörnungen verwendet werden, die eine Drainage von feinsten Feststoffen begünstigen. Werden Feinststoffe bei der Drainage von der Flüssigkeit mitgenommen, also aus den oberen Bereichen des Schaums ausgewaschen, kann dieses einerseits die Schwächung oder Zerstörung des Schaums beschleunigen, da die Lamellen zusätzlich destabilisiert werden, andererseits kommt es zu einer Feststoffanreicherung im unteren Bereich des Schaums und somit zu deutlich inhomogenen Materialeigenschaften. Abbildung 4.22 zeigt einen Teil eines Prismas, bei dem durch Drainage und den Einfluss unterschiedlicher Rohdichten der Feinststoffe (Zement und Flugasche) ein ausgeprägter, dreigeteilter, horizontaler Schichtaufbau entstanden ist. Die untere Schicht weist eine hohe Dichte und Festigkeit auf und besteht vorwiegend aus Zement mit einem relativ geringen w/z -Wert. Darüber findet sich eine Schicht, die sehr leicht ist und eine geringe Festigkeit aufweist. Hierbei handelt es sich vorwiegend um Flugasche mit einem geringen Anteil Zement und hohem Wassergehalt im frischen Zustand. Die dritte Schicht weist Reste einer Schaumstruktur mit einzelnen sehr großen Blasen im oberflächennahen Bereich auf, die deutlich den Schaumzerfall dokumentieren. Die damit verbundene Entlüftung wird auch an der verbliebenen Höhe des Prismas von ca. 3,5 cm gegenüber der Herstellungshöhe von 4,0 cm deutlich. Die ausgeprägte Trennung der einzelnen Schichten resultiert aus einem unterschiedlichen Erhärtungsverlauf und dem unterschiedlichen Verformungsverhalten der verschiedenen zusammengesetzten Schichten. Dadurch bilden sich Grenzflächen aus,

entlang derer der Verbund nicht ausreicht, um die auftretenden Spannungen zwischen den Schichten aufzunehmen.



Abbildung 4.22: Prisma mit ausgeprägtem horizontalem Schichtaufbau durch Drainage und Sedimentation

Ostwald-Reifung

Da der Laplace-Druck im Inneren einer Blase nach Gleichung 2.8 maßgeblich von ihrem Radius bestimmt wird, liegt zwischen Blasen unterschiedlicher Größe stets ein Druckgefälle vor. Dieses Druckgefälle ist der Antrieb für eine Gasdiffusion von kleineren Blasen in größere, die nicht grundsätzlich unterbunden werden kann. Nach Abschnitt 2.4.1 und Gleichung 2.7 gibt es jedoch vier Faktoren, die den Diffusionsprozess beeinflussen und die von der Leimzusammensetzung abhängen. Dabei handelt es sich um

- den Diffusionskoeffizienten D des Gases in der flüssigen Phase
- die Löslichkeit L des Gases in der flüssigen Phase
- die Grenzflächenspannung σ zwischen den Phasen
- Wahl des grenzflächenaktiven Stoffes

Üblicherweise hängen der Diffusionskoeffizient sowie die Löslichkeit eines Gases in einer Flüssigkeit von dem Gas und der Flüssigkeit selbst sowie dem Druck und

der Temperatur ab. Diese Größen sind jedoch unter normalen Umgebungsbedingungen bei Zementleimen nicht oder nur sehr eingeschränkt steuerbar. Da es sich im Falle aufgeschäumter Zementleime bei der flüssigen Phase um ein Feststoff-Flüssigkeitsgemisch handelt und die Sorptions- bzw. Diffusionsprozesse von Gasen in (dichten) Feststoffen meist erheblich langsamer ablaufen, kann über den Feststoffanteil der Diffusionskoeffizient der Leimphase als Ganzes beeinflusst werden. Die Löslichkeit des Gases und der Gasdiffusionsvorgang im Leim wird mit zunehmendem Feststoffanteil reduziert und so die Ostwald-Reifung verlangsamt. Weiterhin kann es durch die Feststoffe im Leim bei einer einsetzenden Blasenverkleinerung zur Ausbildung einer bereits in Abbildung 2.20 angedeuteten gewölbartigen Feststoffstruktur in den Blasenwandungen kommen, die einer weiteren Reduzierung des Blasendurchmessers entgegenwirkt.

Die Grenzflächenspannung zwischen den Phasen kann in dem chemisch komplexen System Zementleim, wie schon mehrfach angesprochen, nicht gezielt gesteuert werden. Daher kann über diesen Parameter keine aktive Verringerung des Diffusionsprozesses erfolgen.

Bei der Wahl des grenzflächenaktiven Stoffes hat primär die Entscheidung zwischen Tensiden und Proteinen eine Auswirkung auf die Ostwald-Reifung. Durch die flächige Vernetzung und Überlagerung der Proteinmoleküle entsteht ein relativ dichter Film um die Blasen, der ausdiffundierendem Gas einen deutlich höheren Widerstand entgegen setzt, als dies durch die untereinander nicht verbundenen Tensidmoleküle möglich ist. Darüber hinaus ist im Gegensatz zur reversiblen Adsorption von Tensiden an den Blasenrenzflächen die Adsorption von Proteinen irreversibel. Dieses führt dazu, dass bei einer anfänglichen Verringerung des Blasendurchmessers durch eine einsetzende Ostwald-Reifung, mit der auch eine Verkleinerung der Blasenoberfläche einhergeht, die Grenzflächenbelegung zunimmt. Der Film um die Blasen wird dabei dichter und dicker und verringert so die Gasdiffusion aus dem Inneren der Blase weiter. Bei Tensiden kommt es mit abnehmender Grenzflächengröße zur Desorption von Tensidmolekülen, da sich stets ein Konzentrationsgleichgewicht zwischen Grenzflächenbesatz und Umgebung einstellt. Die Unterschiede sind in Abbildung 4.23 schematisch dargestellt.

Auch innerhalb der jeweiligen Wirkstoffgruppen beeinflusst die Wahl des verwendeten Tensids oder Proteins die Ostwald-Reifung bzw. den Diffusionswiderstand der Blasenwandungen. Hier spielen vor allem die Grenzflächenbelegung, die Größe der Moleküle und die Ladungsverteilung (speziell bei Proteinen) ei-

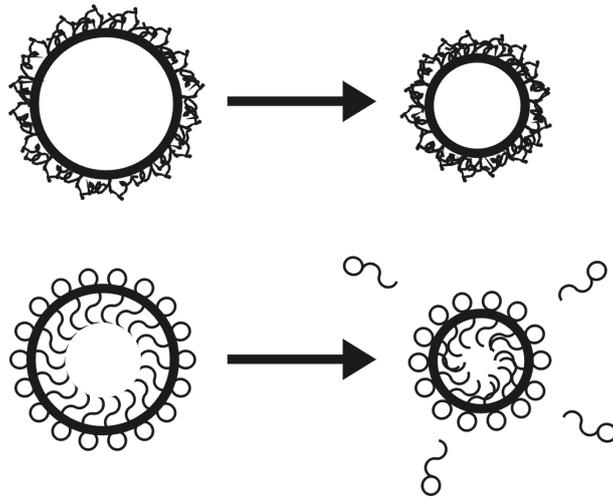


Abbildung 4.23: Ostwaldreifung bei protein- (oben) und tensidstabilisierten Blasen (unten)

ne Rolle. Da der Einfluss der Ladungsverteilung und die Grenzflächenbelegung entscheidend von Wechselwirkungen mit anderen Stoffen abhängen, lassen sie sich im Zementleim wiederum nicht zuverlässig steuern. Die Zusatzmittelhersteller versuchen bei der Formulierung von Luftporen- und Schaumbildnern die resultierende Porenstruktur gezielt zu beeinflussen. Das erfolgt durch Auswahl und Kombination unterschiedlicher Ausgangsstoffe, basierend auf empirisch gewonnenen Erkenntnissen zu deren Wirkungsweise im Zementleim. Zu Einflüssen auf die Ostwald-Reifung liegen jedoch bislang keine bekannten Forschungsergebnisse vor. Das liegt daran, dass die Gasdiffusion und somit auch die Ostwald-Reifung wegen der deutlich geringeren Luftgehalte und daher größeren mittleren Porenabstände bei herkömmlichen Betonen nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Zementhdratation

Die Zementhdratation ist die Grundvoraussetzung für das Ansteifen, Erstarren und Erhärten des Zementleims. Ihr Fortschreiten ist von entscheidender Bedeutung für das Zeitfenster, in dem der Schaum Zerfallsprozessen ausgesetzt ist. Daher leistet ein möglichst schnell ablaufender Hydratationsprozess, der zur zügigen Ausbildung einer stabilen Zementsteinstruktur führt und dadurch den Schaumzerfall zunächst verlangsamt und letztlich ganz unterbindet, einen erheblichen Beitrag zur Stabilität eines Zementschaums. Beeinflusst wird der frühe Erhärtungsverlauf des Zementsteins vor allem durch

- die Zementart und hier insbesondere den Portlandzementklinkeranteil
- die Mahlfineinheit des Zements
- verzögernde oder ggf. auch beschleunigende Einflüsse aus Zusatzmitteln

Gerade in der für die Schaumstabilität wichtigen Anfangsphase der Hydratation, dem Ansteifen, gehen die chemischen Veränderungen primär von den Zementklinkerpartikeln aus (vgl. Abschnitt 3.3.1). Die Verfestigung des Gefüges erfolgt durch Kristallwachstum an den Oberflächen der Zementkörner, das zunächst für eine höhere Rauigkeit und somit zu einer verstärkten inneren Reibung mit dem entsprechenden Ansteigen von Viskosität und Fließgrenze führt. Bei weiterem Wachstum, insbesondere stab- oder faserartiger Calciumsilikathydrat- und Ettringitkristalle, setzt eine zunehmende „Verfilzung“ ein, die Relativbewegungen der Zementkörner untereinander nach und nach unterbindet. Dieses erfolgt schneller, je geringer der Abstand der Zementkörner untereinander ist. Bei der Rezepturentwicklung kann dieser Abstand über den Volumenanteil der Portlandzementklinker an dem gesamten Feststoff- bzw. Leimvolumen gesteuert werden (vgl. Abbildung 4.24). Hierzu kann einerseits die Zugabe von Zusatzstoffen im Verhältnis zum Zement variiert werden, andererseits können durch die Wahl von Portland-, Portlandkomposit-, Hochofen-, Puzzolan- oder Kompositzementen Bindemittel verwendet werden, denen werksseitig, neben dem Portlandzementklinker weitere Stoffe in unterschiedlichem Umfang zugegeben werden. Diese Stoffe können zwar z.T. eigene festigkeitssteigernde Eigenschaften haben, wirken jedoch in der Regel erst mit einer zeitlichen Verzögerung und spielen für das Ansteifen daher nur eine untergeordnete Rolle.

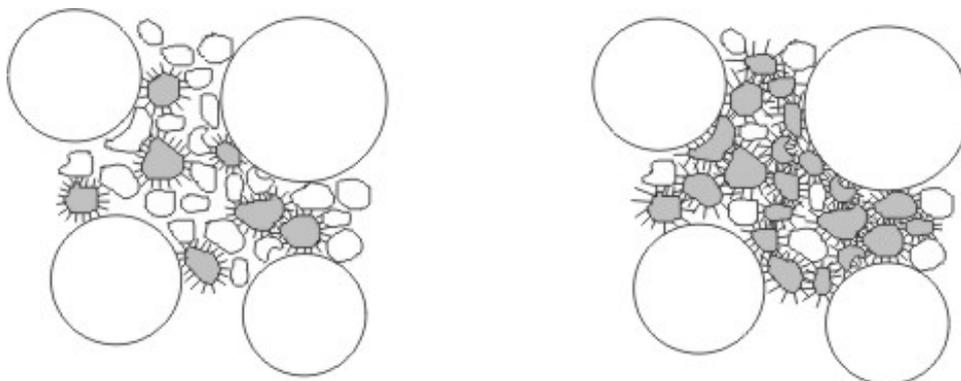


Abbildung 4.24: Portlandzementklinkeranteil beeinflusst den Verlauf des Ansteifens durch den Grad der Vernadelung

Durch eine höhere Mahlfineinheit des Zements können die Zwickelgrößen zwischen den Zementkörnern verringert werden, was ebenfalls zu einer schnelleren

Überbrückung der Abstände durch die wachsenden Kristalle und daher zu einem schnelleren Ansteifen und Erstarren führt (Abbildung 4.25). Unterstützt wird dieser Effekt auch durch eine größere Anzahl von Kontaktpunkten je Volumeneinheit.

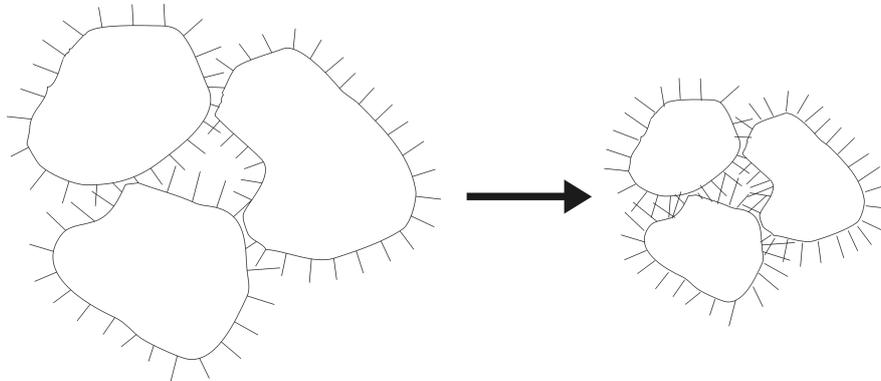


Abbildung 4.25: Mit zunehmender Mahlfeinheit des Zements und kleineren Zwickeln erfolgt eine schnellere Vernetzung und somit schnelleres Ansteifen und Erstarren

Diffiziler stellen sich die Einflüsse aus unterschiedlichen Zusatzmitteln dar. Diese können sowohl unmittelbar in die chemischen Prozesse eingreifen, indem sie zusätzliche reaktive Stoffe in den Leim einbringen, als auch durch sterische oder elektrostatische Effekte die Annäherung von Feststoffpartikeln beeinflussen. Sie können somit den festigkeitsbildenden Prozess verlangsamen oder auch beschleunigen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Fließmittel, Schaummittel und Stabilisierer verwendet. Ihre Wirkungsweisen mit den jeweils zu erwartenden Nebenwirkungen sind in Abschnitt 3.2 aufgeführt. Alle drei Zusatzmittelgruppen weisen tendenziell verzögernde Wirkungen hinsichtlich der anfänglichen Erstarrungsprozesse auf. Ausmaß und Dauer der verzögernden Wirkung sind dabei in großem Maße von dem spezifischen Wirkstoff oder Produkt abhängig und mitunter Teil ihres Wirkkonzeptes. Dieses ist z.B. bei Fließmitteln auf Basis von Polycarboxylatethern der Fall, die durch Filmbildung (Ausbildung einer Doppelschicht, Wasserfilm) und sterische Hinderung gezielt die zunehmende Rauigkeit der Zementpartikel überdecken, die sich aus dem ersten Kristallwachstum kurzer säulenförmiger Ettringitkristalle ergibt. Organische Stabilisierer hingegen binden Wassermoleküle, die der Zementhydratation erst zur Verfügung stehen, wenn sie wieder aus dem Molekülagglomerat herausgelöst werden. Dieser Vorgang erfordert Energie, die dem Reaktionsprozess des Zements entzogen wird und diesen daher verlangsamt. Schaummittel in hoher Dosierung können durch die Ausbildung von Mizellen räumliche Strukturen bilden, die ebenfalls sterische Effekte auf die Feststoffe haben.

Neben diesen stabilisierenden kann die Hydratation jedoch auch zerstörende Einflüsse auf den Schaum haben. So unterliegt der Zementleim durch die Reaktionsprozesse einer stetigen chemischen Veränderung, die sich z.B. in veränderten Ionenkonzentrationen zeigt. In dem sehr sensiblen, von Gleichgewichtszuständen geprägten System der Schaumlamellen können solche Veränderungen durch Wechselwirkungen der Ionen mit Schaummittelmolekülen zu Beeinträchtigungen der Stabilität der Blasenoberflächen führen. Dieses ist insbesondere bei der Verwendung von Tensiden als Schaummittel möglich, da diese nur reversibel an den Grenzflächen adsorbiert werden und beim Auftreten stärkerer Wechselwirkungskräfte die Blasengrenzflächen verlassen und dadurch schwächen können.

Weiterhin hat die fortschreitende Hydratation über die Veränderungen der Morphologie der Feststoffe einen unmittelbaren Einfluss auf das Oberflächenrelief der Blasengrenzflächen und beeinflusst über die chemische Bindung des Wassers, einschließlich der damit einhergehenden Volumenreduktion (Schrumpfen), das Leimvolumen. Bei diesen Effekten ist allerdings zu beachten, dass die Veränderungen sukzessive mit dem Erstarrungs- und Erhärtungsprozess fortschreiten und daher in der für die Schaumstabilität und Porenstruktur ausschlaggebenden Phase des Ansteifens und Erstarrens nur zu einem Teil wirksam sind. Dennoch können Lamellen, die bereits durch Drainage oder Austrocknung in einen sehr labilen Zustand versetzt wurden, bei fortgeschrittenem Ansteifen durch die hydrationsbedingten Leimveränderungen versagen. Anders als bei der anfänglichen ausgeprägten Verformbarkeit des Leims, bei der ein Lamellenversagen zum Blasenzusammenschluß führt, kommt es bei zunehmendem Ansteifen/Erstarren im nur noch sehr eingeschränkt verformbaren Leim zu einem lokal begrenzten Versagen der Lamelle in Form eines Lochs. Die einzelnen Blasen bleiben dabei in ihrer Form erhalten. Die Größe des blasenverbindenden Lochs hängt von der Oberflächenenergie ab, die beim Versagen der Blasenhüllen freigesetzt wird. Diese Energie steht zur Verformung der Lamelle, d.h. zum Überwinden der Fließgrenze des Leims zur Verfügung. Da die Fließgrenze (und ggf. Viskosität) beim Ansteifen bzw. Erstarren des Leims zunimmt, ist die Energie nicht mehr für eine weiträumige Verformung des Leims ausreichend, wie sie bei einem vollständigen Blasenzusammenschluss notwendig ist. Stattdessen wird die betroffene Lamelle nur in einem sehr begrenzten Bereich um den Versagenspunkt herum verformt. Dieses führt zu den bereits in Abbildung 4.4 skizzierten und im folgenden Bild dargestellten, sich überschneidenden Kugelblasen im erhärteten Zementleim.

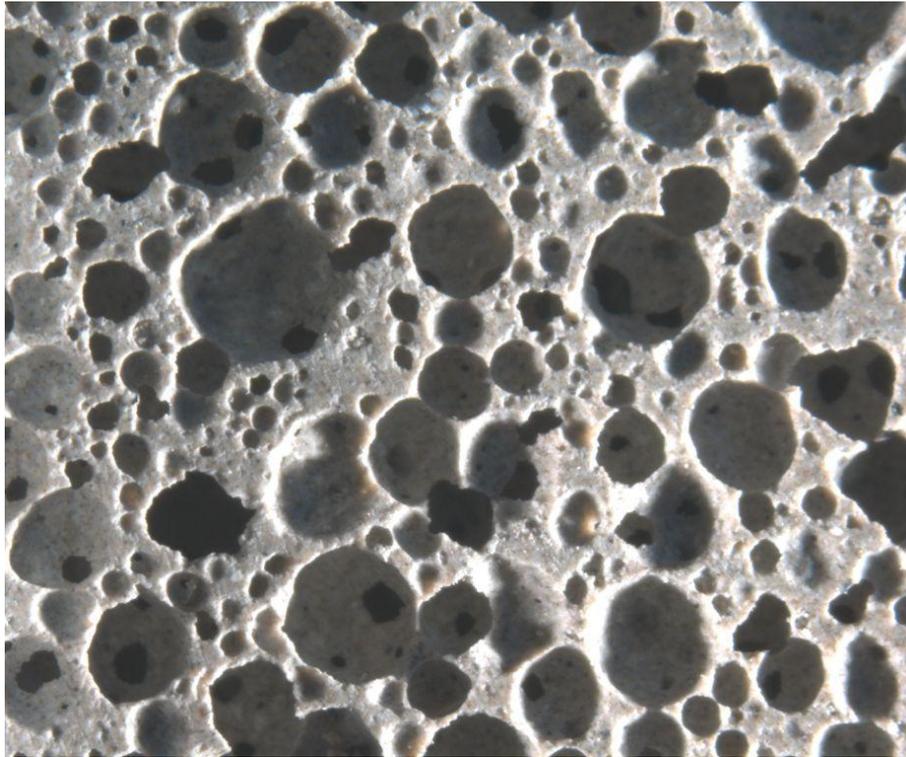


Abbildung 4.26: Schnitt durch einen Zementschaum mit sich überschneidenden und daher überwiegend untereinander verbundenen Kugelporen - Porensystem

Austrocknung und Wasserentzug

Austrocknung und Wasserentzug (Kapillarschwinden - vgl. Abbildung 3.16) treten in den Randbereichen der Schäume auf. Eine Austrocknung erfolgt dabei primär an freien Oberflächen, Wasserentzug im Kontaktbereich zu saugenden Materialien. In beiden Fällen verlieren die oberflächennahen Schaumlamellen Wasser, was zu ihrer Ausdünnung führt. Reicht der Wassergehalt nicht mehr aus, um eine im Gleichgewicht befindliche stabile Blasenhülle zu bilden, kommt es zur Zerstörung der Blase. Anders als im Inneren des Schaums, wo ein Lamellenversagen zu einer Veränderung der Blasenstruktur (Koaleszenz) führt, jedoch zunächst den Gesamtluftgehalt nicht beeinflusst, kommt es an freien Oberflächen zu einer Vereinigung mit dem darüber liegenden Gasraum. Dieses entspricht einem Entlüften und hat eine Volumenabnahme des Schaums zur Folge. Gleichzeitig wird durch das Zerplatzen einer Blase das Gleichgewicht der umliegenden Blasen gestört. Der durch die Zerstörung der Blase freigesetzte Leim fließt in die angrenzenden, darunter befindlichen Lamellen und führt zu Verformungen im Umfeld der zerstörten Blase. Diese Verformungen stellen eine zusätzliche Belastung für die betroffenen Lamellen dar, die dadurch einer erhöhten Gefahr unterliegen, ebenfalls zerstört zu werden. Neben der reinen Ver-

formung der Lamellen ergibt sich ein zweiter Aspekt der Schwächung, da bei der Verformung bereichsweise die Fließgrenze des Leims überschritten wird. Der einmal in Bewegung befindliche Leim ist deutlich anfälliger für weitere Strukturveränderungen als der in Ruhe befindliche, bei dem zunächst die Fließgrenze überwunden werden muss, bevor es zu Leimbewegungen kommt. Dadurch wird z.B. die Drainage des Schaums beschleunigt. Bei sehr leichten Schäumen kann die Zerstörung einer Blase an der Oberfläche daher zu den Seiten und nach unten in den Schaum hinein eine Kettenreaktion auslösen, bei der ganze Bereiche des Schaums zerstört werden. Treten diese Effekte bei sehr fragilen Schäumen oder in Kombination mit ausgeprägten Drainagevorgängen über einen längeren Zeitraum auf, kann es zur vollständigen Zerstörung bzw. zum weitgehenden Entlüften des Schaums kommen, wie an dem Prisma in Abbildung 4.27 zu sehen.

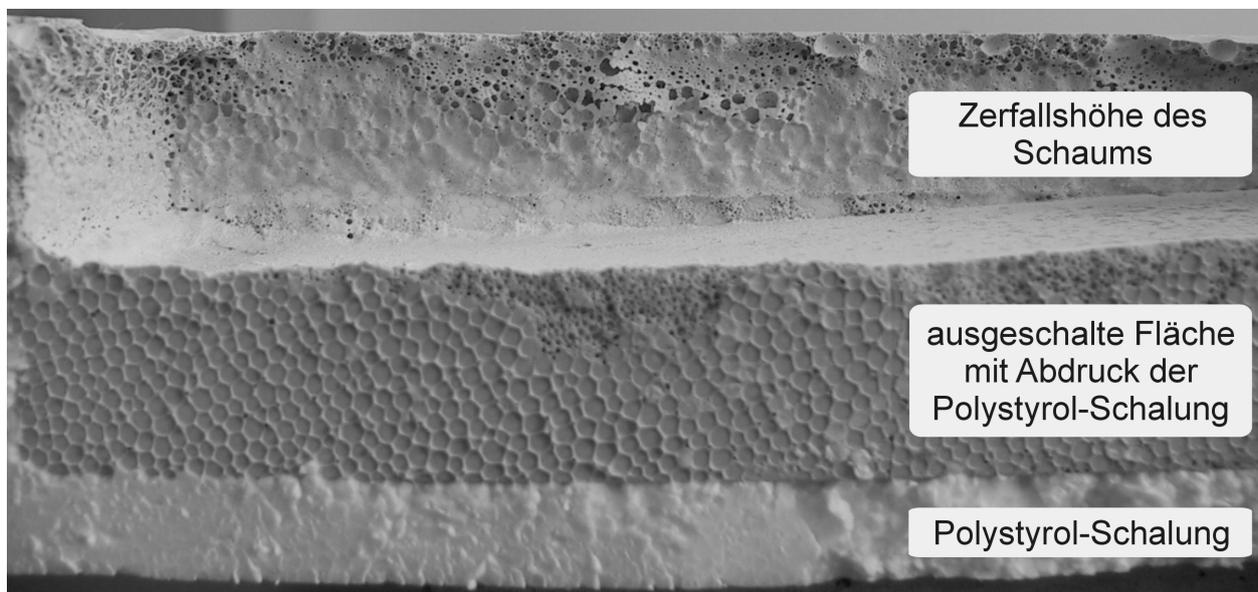


Abbildung 4.27: Schaumprisma nach weitgehendem Entlüften

In Einzelfällen kann eine Austrocknung im oberflächennahen Bereich auch stabilisierend wirken. Insbesondere bei Leimen, die zu starker Drainage neigen, kann diese durch Reduzierung des Wassergehaltes über Verdunstung vermindert werden. Das reduziert die Koaleszenz und erhöht die Stabilität des Schaums. Dabei ist allerdings zu beachten, dass dieses nur für den unmittelbaren Einflussbereich des Austrocknungsprozesses gilt. Abbildung 4.28 zeigt ein Schaumprisma, bei dem der oberflächennahe Bereich durch Austrocknung stabilisiert wurde, der Zerfall des Schaums darunter (im Inneren des Prismas) jedoch unvermindert anhielt. So ist ein ausgedehnter Hohlraum in dem Prisma entstanden. Meist deutet sich das durch starkes Reißen oder Einbrechen der Oberfläche an.



Abbildung 4.28: Schaumprisma mit ausgedehntem Hohlraum durch oberflächliche Schaumstabilisierung und inneren Schaumzerfall

Ein Wasserentzug durch angrenzende, saugende Materialien kann zu den gleichen zerstörenden Einflüssen auf die Blasen führen. Hier kommt es jedoch nicht zum Entlüften, sondern zum gehäuften Auftreten von Blasenkoaleszenz im Bereich der Materialgrenze. Je nach Orientierung der Materialgrenzfläche und rheologischen Eigenschaften des Leims verharren die entstehenden, großen Blasen an ihrem Entstehungsort oder können entlang der Materialgrenzfläche aufsteigen. Bei ungünstigen Geometrien kann es dadurch zu Blasenansammlungen kommen, die oft eine weitere Koaleszenz nach sich ziehen. Die im Bereich der Materialgrenzfläche verbleibenden großen Blasen beeinträchtigen den Verbund zwischen den Materialien oder ggf. die Oberflächeneigenschaften des Schaums, wenn es sich um Schalflächen handelt.

Bei stark ausgeprägter Austrocknung oder stark ausgeprägtem Wasserentzug ist auch eine Beeinflussung der Zementhydratation durch einen lokal zu geringen Wassergehalt möglich. Da die für die Stabilität der Schäume erforderlichen Wassergehalte in der Regel deutlich oberhalb der für die Hydratation erforderlichen liegen, ist bei gleichbleibenden Umgebungsbedingungen eher ein Schaumzerfall zu erwarten als eine unvollständige Hydratation des Zements. Für stabile zementgebundene Schäume kann daher in der Regel davon ausgegangen werden,

dass mit der Zeit eine quasi vollständige Zementhydratation erfolgt. Dieses gilt jedoch nicht, wenn durch klimatische Veränderungen eine nennenswerte Verdunstung erst nach dem Erstarren eintritt. In diesem Fall ist die Porenstruktur weitgehend unveränderlich, der Hydratationsprozess jedoch noch nicht abgeschlossen, so dass eine unvollständige Hydratation trotz stabiler Porenstruktur möglich ist.

Allen zuvor beschriebenen Prozessen einer unerwünschten Wasserabgabe kann in begrenztem Umfang durch die Zugabe von wasserbindenden Stoffen, d.h. vor allem organischen Stabilisierern, entgegengewirkt werden. Zwar kann dadurch die Wasserabgabe nicht völlig unterbunden werden, durch die Bindungskräfte zwischen den Wasser- und den Stabilisierermolekülen ist jedoch eine höhere Energie erforderlich, um dem Leim die Wassermoleküle zu entziehen. Daher wird der Wasserentzug erheblich verlangsamt, so dass in der für die Schaumstabilität kritischen Phase bis zum Abschluss des Erstarrens nur geringe Wasserverluste auftreten. Dabei ist allerdings zu beachten, dass auch die Zementhydratation und somit die Erstarrung selbst durch die starke Wasserbindung negativ beeinflusst und daher verlangsamt wird. Auch hier muss zunächst die Bindungsenergie überwunden werden, bevor die Wassermoleküle für den Hydratationsprozess zur Verfügung stehen.

Veränderungen der Porenstruktur

Die Herstellung aufgeschäumter Zementleime führt bei hohen Luftgehalten zu einem zementösen Kugelschaum. Von diesem ausgehend können die dargestellten Zerfallsprozesse des Schaums zunächst in zwei übergeordnete Veränderungen der Porenstruktur unterschieden werden:

- in alle Richtungen gleichmäßig über den gesamten Schaum auftretende Veränderungen der Porenstruktur
- Veränderungen der Porenstruktur, die in vertikaler Richtung zu inhomogenen Blasenradienverteilungen oder Blasenverteilungen führen

In alle Richtungen gleichmäßig auftretende Veränderungen der Porenstruktur können zwar einen Einfluss auf die Eigenschaften (z.B. Tragfähigkeit, Gefügedichtheit) des erhärteten Schaums haben, stellen jedoch insofern keinen Nachteil dar, als dass die Rohdichte und das Volumen konstant bleiben und die

Homogenität des Baustoffes gewährleistet ist. Somit bleiben die entscheidenden Grundvoraussetzungen für eine zielgerichtete Anwendung des erhärteten Zementschaums trotz Veränderung der Porenstruktur erhalten. Auslöser für derartige Veränderungen sind Blasenkoaleszenzen bedingt durch die Annäherung von Blasen und das Versagen einzelner Lamellen durch destabilisierende chemische Veränderungen des Leims sowie die Ostwald-Reifung.

Homogene Schäume können in ihrer Porenstruktur durch die folgenden charakteristischen Parameter beschrieben werden:

- mittlerer Porendurchmesser
- Porengrößenverteilung
- Vorliegen von überwiegend geschlossenen oder überwiegend verbundenen Poren

Der Zusammenschluss von Blasen zu einer einzelnen (Blasenkoaleszenz), führt direkt zu einer Erhöhung des mittleren Porendurchmessers und einer Verschiebung der Porengrößenverteilung hin zu größeren Poren.

Die Ostwald-Reifung ist in ihrer Wirkung auf die Porenstruktur deutlich differenzierter zu betrachten. Da der Motor für die Ostwald-Reifung der von den Blasendurchmessern abhängige Druckunterschied zwischen den Blasen ist, tritt eine ausgeprägte Ostwald-Reifung vor allem in Schäumen mit sehr unterschiedlichen Blasengrößen auf. Hier führt sie sowohl zu einer Vergrößerung der großen als auch zu einer Verkleinerung der kleinen Blasen. Sie bewirkt also eine weitere Diversifizierung der Blasengrößen. Da bei Diffusion eines bestimmten Gasvolumens von einer kleinen in eine große Blase der Durchmesser der kleinen Blase deutlich stärker abnimmt als der der großen Blase zunimmt, kommt es dabei zu einer Verringerung des mittleren Porendurchmessers. Weil sich dabei die Druckunterschiede zwischen den Blasen verstärken, werden die Diffusionsprozesse im Verlauf der Ostwald-Reifung zunehmend beschleunigt, bis die kleinen Blasen ausgezehrt sind und sich auflösen. Die dadurch bedingte Reduzierung der Anzahl kleiner Poren und damit einhergehend der Gesamtzahl der Poren führt wiederum zu einer Erhöhung des mittleren Blasendurchmessers und verschiebt die Porengrößenverteilung hin zu größeren Poren. Da die Ostwald-Reifung bei Zementleimen meist durch das fortschreitende Erstarren unterbrochen wird, kommt es nur vereinzelt zur vollständigen Rückbildung kleiner Blasen. Meist sind dabei solche Blasen betroffen, die schon bei ihrer Entstehung sehr klein

waren, somit einen hohen Innendruck und ein geringes Luftvolumen aufwiesen, und daher einem schnellen Diffusionsvorgang unterlagen. In einem Schaum mit sehr einheitlicher Blasengröße spielt die Ostwald-Reifung nur eine geringe Rolle, da die Druckunterschiede zwischen den Blasen gering sind, eine Diffusion nur sehr langsam erfolgt und sich daher bis zum Erstarren keine wesentlichen diffusionsbedingten Veränderungen der Porenstruktur ergeben. Auf Grund der großen (Mindest-)Dicke der Lamellen und dem damit verbundenen hohen Diffusionswiderstand läuft der Prozess der Ostwald-Reifung in aufgeschäumten Zementleimen insgesamt relativ langsam ab. Dadurch spielt er im Vergleich zur Koaleszenz und anderen Einflüssen auf die Porenstruktur in der Regel eine untergeordnete Rolle.

Die chemische Bindung des Wassers im Zuge der Hydratation führt zu einer gleichmäßigen Volumenabnahme des Leims (siehe Abschnitt 3.3.1) und somit ebenfalls zu einer, wenn auch geringen, Vergrößerung der Porendurchmesser. Dieser Effekt trägt maßgeblich zur Ausbildung von Porensystemen bei.

Porensysteme aus überwiegend verbundenen Poren (vgl. Abbildung 4.26) entstehen wie bereits in Abschnitt 4.2.4 erläutert aus Schäumen, die sehr hohe Luftgehalte haben und schon im frischen Zustand oder durch Drainage/Blasenannäherung extrem dünne Lamellen aufweisen. Versagen diese Lamellen bei bereits fortgeschrittener Erstarrung und somit eingeschränkter Verformbarkeit des Leims, kommt es zu einer begrenzten Lochbildung in der Lamelle zwischen zwei Blasen, ohne dass sich die Blasen insgesamt verformen und zu einer Blase zusammenschließen. Wiederholen sich diese Vorgänge bei zahlreichen nebeneinander liegenden Blasen, entstehen zusammenhängende Porenstrukturen. Diese basieren zwar auf Kugelporen, haben jedoch nicht mehr deren charakteristischen Eigenschaften hinsichtlich Dichtigkeit. Je nach Geometrie der Lamellenfragmente ist auch die Gewölbewirkung beim Lastabtrag eingeschränkt. Ein Vorteil dieser Struktur ist jedoch eine Rohdichte an der unteren Grenze des für die Rezeptur Möglichen. Untereinander verbundene Poren und Porensysteme bei denen Lamellen nur punktuell versagen (vgl. Abbildung 4.26) treten bei höheren Luftgehalten sehr häufig auf.

Im Extremfall bleiben von den Lamellen zwischen den Blasen nur noch dünne Stege übrig, wie in Abbildung 4.29, links zu sehen ist. Damit können zwar extrem hohe Luftgehalte bzw. extrem geringe Dichten erreicht werden, die Festigkeit eines solchen Schaums ist jedoch sehr niedrig, da die Stege nur eine sehr geringe Stabilität aufweisen. Der rechte Teil der Abbildung 4.29 zeigt, dass sich

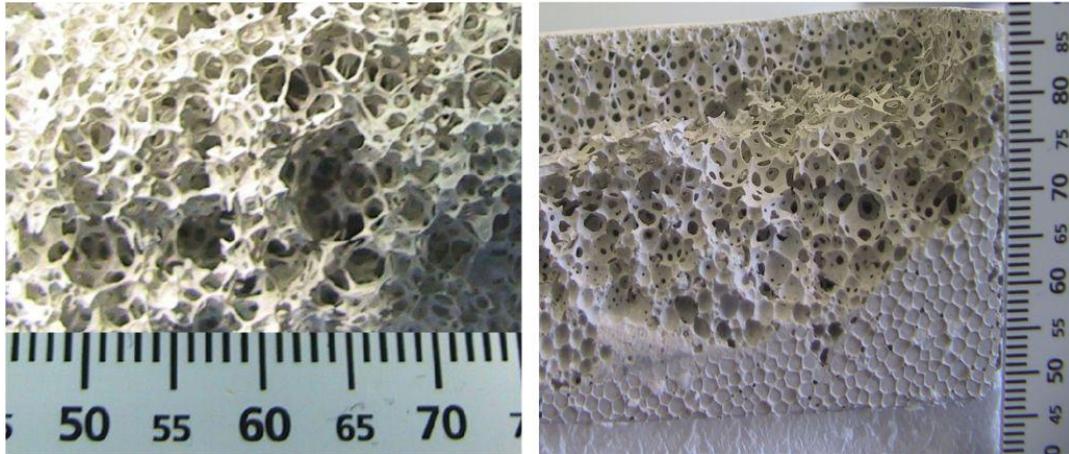


Abbildung 4.29: Extremer Fall sich überschneidender Kugelblasen in erhärtendem Zementleim, bei dem von den porentrennenden Lamellen nur noch Stege erhalten sind; links: Detail, rechts: Übersicht

derart filigrane Strukturen nicht gleichmäßig in größeren Mengen herstellen lassen. Zum Einbringen so hoher Luftgehalte ist ein sehr niederviskoser Leim erforderlich, der dadurch erhebliche Drainageerscheinungen aufweist. Daher stellen sich solche sehr leichten Strukturen nur in begrenzten Bereichen als Teil eines inhomogenen Schaums ein.

Auslöser für inhomogenen Veränderungen der Porenstruktur sind insbesondere die Drainage aber auch Austrocknung oder Wasserentzug, die zu lokalen Veränderungen der Porenstruktur führen. Die resultierenden deutlich inhomogenen Blasenverteilungen und -strukturen sind in der Regel für eine qualifizierte Anwendung nicht hinnehmbar, da die Baustoffeigenschaften innerhalb eines Bauteils erheblich variieren und nicht genau beschrieben werden können. Durch das primär drainagebedingte Abfließen von Wasser, den darin gelösten Stoffen und teilweise auch feinsten Feststoffe, wird das Leimvolumen im oberen Bereich eines Schaums reduziert. Dadurch erhöht sich der relative Blasenanteil dort und die Rohdichte verringert sich. Wie schon erläutert kann dieses bis zur Zerstörung der obersten Luftblasen und somit zum Entlüften des Schaums führen. Im unteren Teil des Schaums verhält es sich umgekehrt. Hier reichert sich die flüssige Phase an. Dadurch kommt es zu einem von oben nach unten abnehmenden Volumenbruch, wie er in Abbildung 4.30 zu erkennen ist.

Bei sehr ausgeprägten Drainageerscheinungen kann es auch zur Ausbildung von horizontalen Grenzen kommen. Unterhalb dieser Grenze entsteht ein dichtes Gefüge aus dem drainierten Zementleim, oberhalb liegt in der Regel ein extrem labiler Schaum mit sehr geringen Leimanteilen vor, der auf dem dichten Leim



Abbildung 4.30: Bruchfläche eines Zementschaumprismas mit von unten nach oben zunehmendem Volumenbruch und zunehmenden Porengrößen

der unteren Schicht aufschwimmt. Ein entsprechendes Beispiel ist in Abbildung 4.31 gezeigt.

Austrocknung an freien Oberflächen und Wasserentzug durch angrenzende saugende Materialien haben vorwiegend einen lokalen Einfluss auf die Porenstruktur und führen daher ebenfalls zu inhomogenen Schaumeigenschaften. Der Wasserverlust ist Auslöser für Blasenkoaleszenzen und bedingt somit eine Zunahme großer Blasen und damit verbunden eine Erhöhung des mittleren Porendurchmessers. An freien Oberflächen ruft er ggf. auch Entlüftungserscheinungen hervor, die zur teilweisen Zerstörung des Schaums führen. Die mit ihm verbundene Volumenreduktion des Leims erfolgt zwar beschleunigt, unterscheidet sich aber im Umfang wenig von der normalen Austrocknung während der Erhärtung.

Da aufgeschäumte Zementleime, wie alle Schäume, eine minimale Oberflächenenergie und daher auch eine minimale innere Oberfläche anstreben, verschieben sich der mittlere Porendurchmesser und die Porengrößenverteilung als Ergebnis aller vorgenannten Mechanismen mit fortschreitender Strukturveränderung in Richtung größerer Poren.

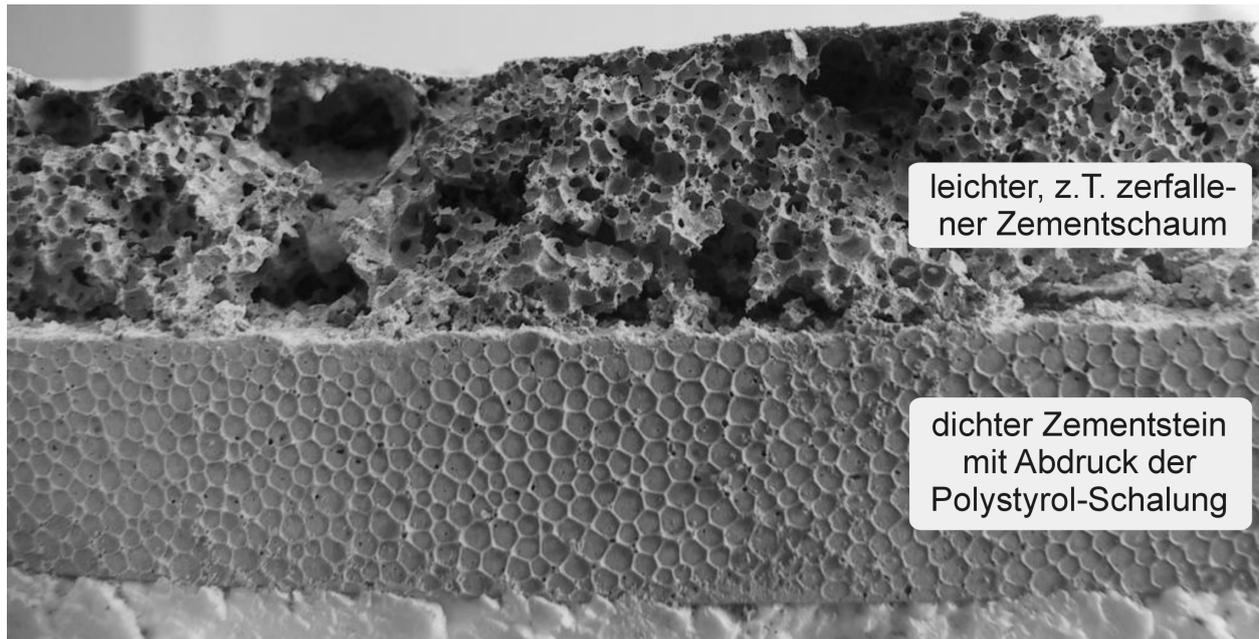


Abbildung 4.31: Ausschnitt aus einem Zementschaumprisma, das eine durch starke Drainage hervorgerufene, ausgeprägte Grenze zwischen dichtem Zementstein und leichtem Zementschaum aufweist

4.2.5 Erhärten, Austrocknen und Schwinden

An die Erstarrungsphase der Leime schließt die weitere Erhärtung an. In dieser Phase sind keine grundsätzlichen Veränderungen der Porenstruktur mehr möglich, da der Zementleim kein fluides Verhalten mehr aufweist, sondern eine feste Struktur ausgebildet hat. Dennoch kommt es, bedingt durch den fortschreitenden Hydratationsprozess und eine zunehmende Austrocknung, zu weiteren Schwindverformungen.

Diese Schwindverformungen können sowohl durch autogenes Schwinden als auch durch Trocknungsschwinden (vgl. Abschnitte 3.3.1 und 3.3.2) hervorgerufen werden. Angesichts der relativ hohen w/z -Werte der aufzuschäumenden Leime ist autogenes Schwinden normalerweise nicht zu erwarten, da es durch den Wasserüberschuss nicht zu einer inneren Austrocknung kommt. Bei offenen Porensystemen kann es jedoch zu einer relativ schnellen Austrocknung kommen, da diese nicht allein durch Feuchtediffusion im Zementstein über die Bauteiloberfläche erfolgt, sondern auch innerhalb des Zementschaums an den Porenoberflächen auftritt. Dadurch wird das Trocknungsschwinden stark beschleunigt und erstreckt sich nicht nur über die außenflächennahen Bereiche, sondern schreitet auch im Inneren schnell fort. Durch das schnelle Austrocknen kann aber auch der w/z -Wert in ungünstigen Fällen während des Hydratationsprozesses

so weit reduziert werden, dass es trotz des anfänglich hohen Wassergehalts zu einem nennenswerten autogenen Schwinden kommt. Der Austrocknung kommt also bei Zementschäumen eine besondere Bedeutung zu, einerseits weil sie auf Grund der oft geringen Diffusionsdichtheit und großen inneren Oberfläche der Zementschäume sehr schnell erfolgt und das Trocknungsschwinden nicht nur auf das Bauteil als Ganzes, sondern auch unmittelbar auf die einzelnen Lamellen einwirkt, andererseits ist bei sehr starker Austrocknung zusätzlich mit autogenem Schwinden zu rechnen. Der Fortschritt des Trocknungsschwindens wird durch die Umgebungsbedingungen, insbesondere Temperatur und relative Feuchte, bestimmt. Er kann durch die Art und Dauer der Nachbehandlung beeinflusst werden. Das Trocknungsschwinden ruft bei den für geschäumte Betone sinnvollen w/z -Werten den überwiegenden Teil der Schwindverformungen hervor.

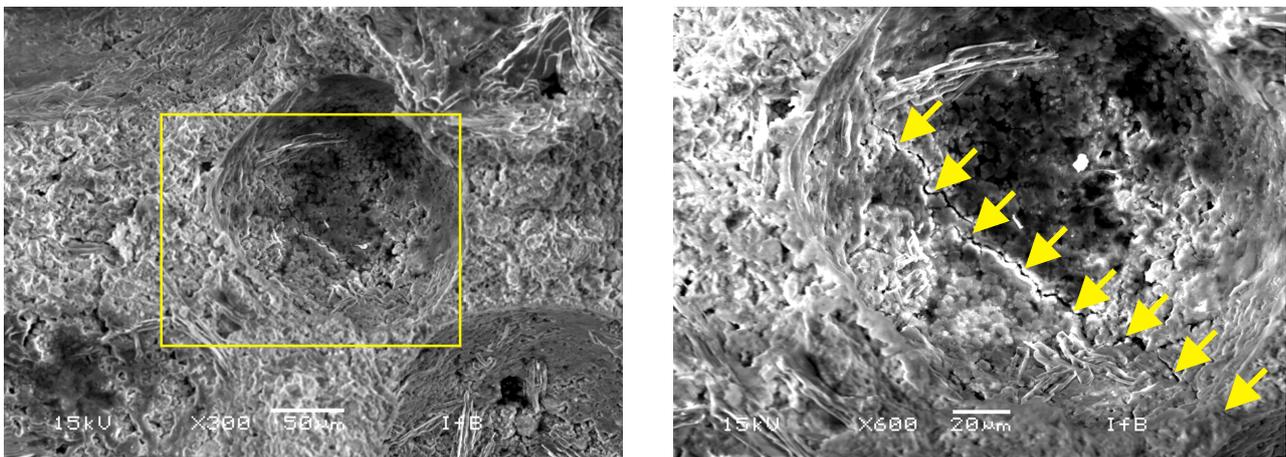


Abbildung 4.32: REM-Aufnahmen eines Schwindrisses in einer Zementschaumlamelle, links: Übersicht, rechts: Detailausschnitt

Die Schwindverformungen führen sowohl zu einer Kontraktion des gesamten Schaums als auch zu Verformungen im Inneren. Diese inneren Verformungen bewirken eine weitere Verschlangung der Lamellen und Stege, führen in diesen aber auch zu Zugspannungen, die ggf. ein Reißen der Lamellen bewirken (vgl. Abbildung 4.32). Die makroskopischen Verformungen des ganzen Schaums zeigen sich bei Prismen z.B. in einer Verkürzung. Es kann aber auch zur Ausbildung von Schwindrissen kommen, die je nach Bauteilgeometrie und möglichen Verformungsbehinderungen unterschiedlich ausgeprägt sein können. Abbildung 4.33 zeigt einen Ausschnitt aus der Oberfläche eines Zementschaumprismas mit ausgeprägten Schwindrissen in Längs- und Querrichtung.

Die Möglichkeiten zur Vermeidung einer solche Rissbildung sind bei Verwen-

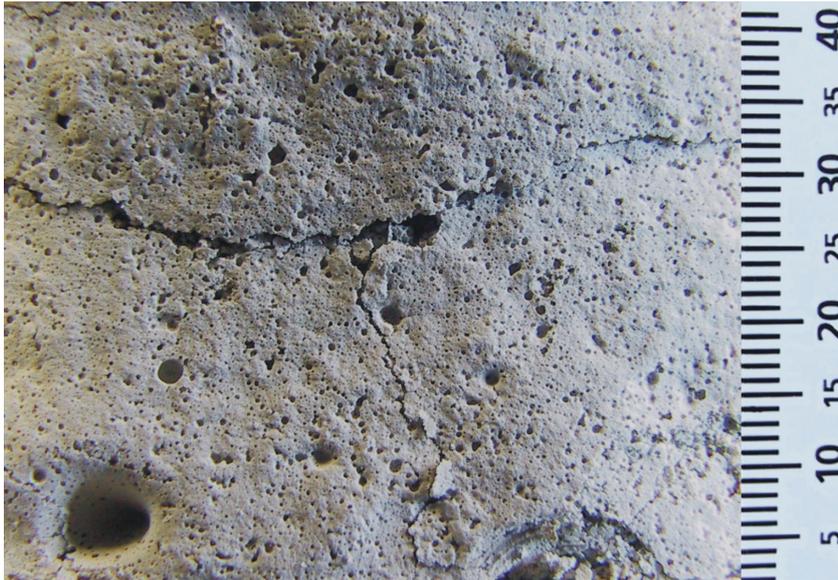


Abbildung 4.33: Ausgeprägter Schwindriss an der Oberfläche eines erhärteten Zementschaumprismas

dung von Zementleimen ohne Gesteinskörnung begrenzt. Schwindprozesse können zwar durch einen möglichst geringen Zement- und Wassergehalt bei gleichzeitig hohem Anteil inerter Stoffe minimiert werden, da diese Ansätze aber nur bedingt mit den Erfordernissen der Schaumherstellung in Einklang gebracht werden können, muss eine gewisse Rissbildung bei aufgeschäumten Zementleimen in Kauf genommen werden. Für viele Anwendungsfälle stellt eine begrenzte Rissbildung jedoch keinen wesentlichen Nachteil dar. Dieses gilt vor allem für Konstruktionen, bei denen aufgeschäumte Zementleime in Verbindung mit anderen, tragenden oder dichtenden, mineralischen oder metallischen Baustoffen zur Anwendung kommen. Dabei kann es sich um Mehrfachwände, Brandschutzverkleidungen o.ä. handeln.

4.3 Zusammenfassung der Modellvorstellungen und Vorgaben zur Rezepturentwicklung

Bei der Herstellung aufgeschäumter Zementleime sind zwei Phasen gesondert zu betrachten. Dabei handelt es sich einerseits um den Aufschäumprozess und andererseits um die Phase des Ansteifens, Erstarrens und Erhärtens. Die Anforderungen an den Leim unterscheiden sich in diesen Phasen grundlegend, weshalb bei der Rezepturentwicklung vor allem ein Ausgleich zwischen gegenläufigen Zielsetzungen erreicht werden muss.

Eine zentrale Rolle spielen dabei die rheologischen Eigenschaften des Leims. Für die Aufschäumvorgänge sind relativ geringe Leimviskositäten vorteilhaft und insbesondere in statischen Mischern ist eine ausreichende Fließfähigkeit unabdingbar. Mit zunehmender Viskosität steigt zwar die Stabilität des Schaums gegen Entlüften, da der Lufteintrag aber deutlich vermindert wird, lassen sich nicht die für aufgeschäumte Zementleime erforderlichen, hohen Luftgehalte erreichen. Eine mit zunehmender Viskosität steigende innere Reibung führt außerdem zu einer deutlichen Erwärmung, die die chemischen Prozesse beeinflusst. In der Phase von Ansteifen, Erstarren und Erhärten wirken sich eine möglichst hohe Viskosität, Fließgrenze und Zähigkeit positiv auf den Schaum aus, da sie allen schaumzerstörenden Prozessen entgegenwirken. Speziell die Drainage als dominierender Zerstörungsmechanismus kann nur durch die Vermeidung von Entmischungen und eine weitgehende Unterdrückung von Fließvorgängen im Leim wirkungsvoll reduziert werden. Dazu ist es erforderlich, den hohen Wasseranteil im Leim zu binden und die Wassermoleküle in ihre Mobilität einzuschränken.

In Abbildung 4.34 sind die entscheidenden stofflichen Einflüsse für das Aufschäumen sowie die Schaumstabilität während des Ansteifens schematisch dargestellt.

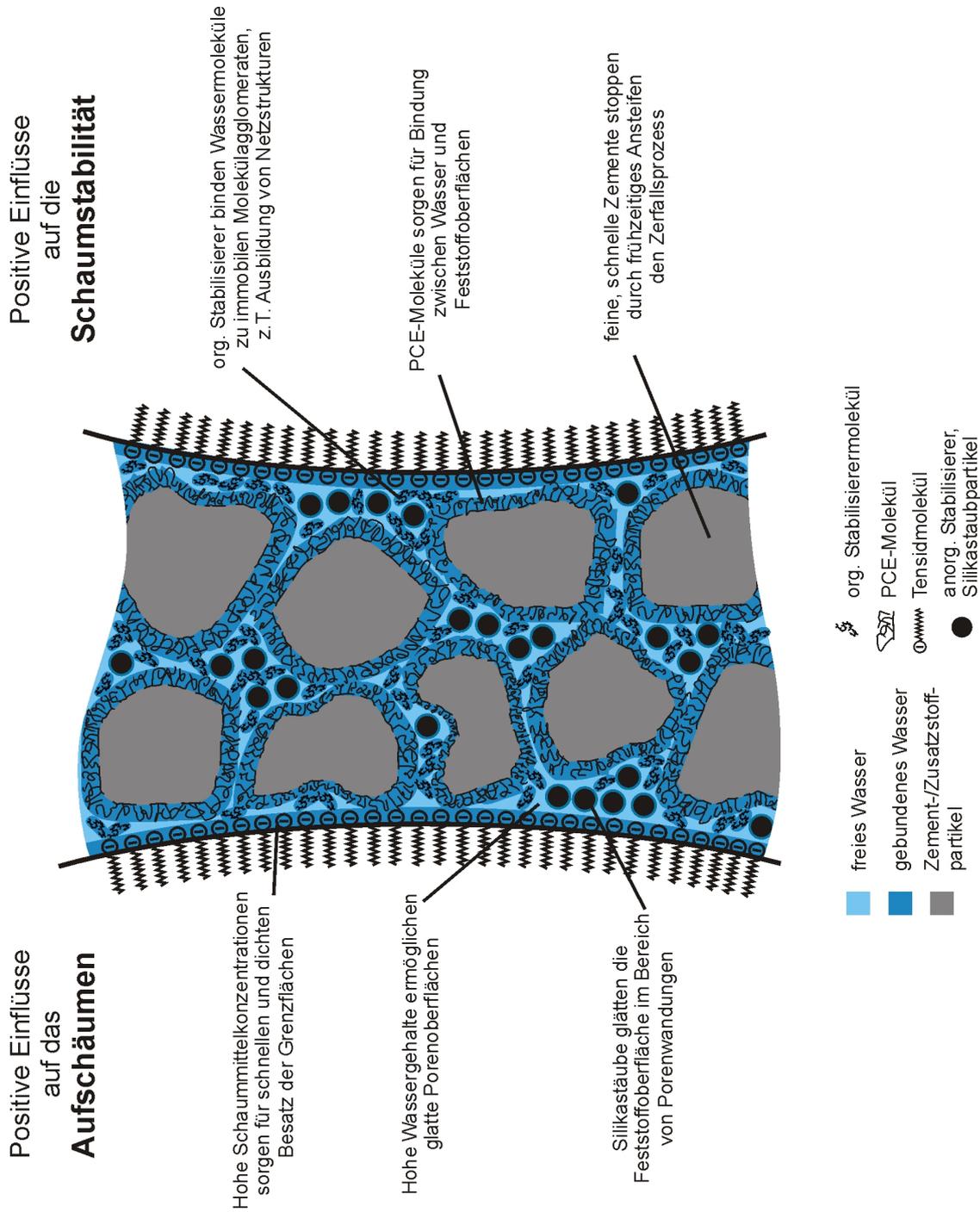


Abbildung 4.34: Modellvorstellung zu Wirkungsweisen der Ausgangsstoffe auf die Schaumherstellung und -stabilität (Darstellung nicht maßstabgetreu)

Die Modellvorstellung sowie die detaillierteren Erläuterungen zu den einzelnen Aspekten der Herstellung zementgebundener Schäume im Abschnitt 4.2 liefern die Grundlage für Rahmenvorgaben zur Rezepturentwicklung von mechanisch aufzuschäumenden Zementleimen. Sie sind das Ergebnis einer Abwägung positiver und negativer Wirkungen auf das Aufschäumverhalten der Leime und die Stabilität der resultierenden Schäume. Im Folgenden sind die Rezepturvorgaben stichpunktartig mit kurzer Erläuterung aufgelistet:

- Viskosität und Zähigkeit der Leime sind so hoch einzustellen, dass im Aufschäumprozess gerade noch ein ausreichender Lufteintrag erfolgt. Dazu ist eine Abstimmung auf die Maschinenteknik erforderlich.
- Der Wassergehalt muss zur Ausbildung stabiler Blasen deutlich über dem Sättigungspunkt des Feststoffgemischs liegen. Die Wasserfilmdicken zwischen den Feststoffen müssen eine ausreichende Mobilität der Schaummittelmoleküle gewährleisten. Zu hohe Wassergehalte führen zu Entmischungen im Leim, ausgeprägten Drainageerscheinungen und starkem Schwinden. Daher ist der Wassergehalt so gering wie nötig zu halten, um die angestrebten Luftgehalte zu erreichen.
- Der Portlandzementklinkeranteil muss so hoch sein, dass trotz verzögernden Wirkungen der Zusatzmittel ein ausreichend schnelles Ansteifen und Erstarren erfolgt, das den Schaumzerfall stoppt. Hier ist eine individuelle Abstimmung zwischen Zementart und Zusatzmitteln erforderlich. Zu hohe Portlandzementklinkeranteile steigern die Schwindverformungen und sind daher zu vermeiden.
- Als Zusatzstoffe können sowohl Flugaschen als auch Kalksteinmehle und Silikastaube verwendet werden. Sie haben unterschiedliche Vor- und Nachteile für das Aufschäumen und Ansteifen bzw. Erstarren, die jeweils durch die anderen Rezepturparameter kompensiert werden können. Keiner der Stoffe ist aus theoretischen Erwägungen eindeutig zu präferieren. Grundsätzlich ist die Zugabe von Zusatzstoffen sinnvoll, um den Zementgehalt begrenzen zu können und ggf. die Korngrößenverteilung zu beeinflussen.
- Als Stabilisierer stehen anorganische und organische Produkte zur Verfügung. Neben der wasseranlagernden, stabilisierenden Wirkung ergänzen anorganische Stabilisierer das Kornband und glätten so die Feststoffoberfläche in den Blasenwänden. Wegen der Feinheit der Nanopartikel führen sie

zu einer Verminderung der durchschnittlichen Wasserfilmdicken zwischen den Feststoffen, was die Mobilität der Schaummittelmoleküle und somit das Aufschäumen behindert. Diesem Effekt kann z.T. durch Zugabe von organischen Stabilisierern begegnet werden. Diese sehr großen Moleküle binden Wasser und verhindern durch ihre Ausdehnung eine zu nahe Annäherung der Feststoffpartikel aneinander. Dieses wirkt sich auch günstig auf das Aufschäumen aus, obwohl die Stabilisierer grundsätzlich durch die Erhöhung der Viskosität den Lufteintrag behindern. Durch das Binden von Wasser und eine räumliche Vernetzung der organischen Stabilisierermoleküle wirken diese der Drainage entgegen. Es erscheint sinnvoll, anorganische und organische Stabilisierer in Kombination zu verwenden, um die jeweiligen Vorteile zu nutzen und ihre Dosierung und damit verbundene negative Nebenwirkungen zu begrenzen.

- Als Schaummittel können sowohl Tenside als auch Proteine verwendet werden. Tenside sind kleine, mobile Moleküle, die neue Grenzflächen schnell besetzen, jedoch eine geringere stabilisierende Wirkung haben. Proteine haben umgekehrt durch Vernetzung eine bessere stabilisierende Wirkung, sind jedoch träger. Eine Kombination aus beiden kann vorteilhaft sein, jedoch müssen diese chemisch aufeinander abgestimmt sein. Da Proteine stärker verzögernd wirken und durch die Verwendung von organischen Stabilisierern und Fließmitteln auf Basis von Polycarboxylatethern bereits große Mengen organischer Makromoleküle mit sich überschneidenden Eigenschaften verwendet werden, sind Tenside tendenziell zu bevorzugen.
- Bei Fließmitteln ist davon auszugehen, dass sich Polycarboxylatether besonders eignen, da ihr Wirkprinzip der sterischen Hinderung neben der Verflüssigung auch die Ausbildung stabiler Wasserfilme um die Feststoffe begünstigt. Es ist allerdings bekannt, dass sie bei Überdosierung das Ansteifen verzögern.

Tabelle 4.2 fasst noch einmal konkret die unterschiedlichen für die Rezepturentwicklung wesentlichen Parameter und Ausgangsstoffe nebst ihren Auswirkungen zusammen. Dabei werden die Rezepturparameter in der mittleren Spalte aufgelistet und nach links bzw. rechts deren wesentliche Auswirkungen auf den Aufschäumvorgang sowie das Ansteifen, Erstarren und Erhärten in Stichworten dargestellt.

Table 4.2: Übersicht über die Einflüsse und Wirkungsweisen verschiedener Rezepturparameter auf Schaumherstellung und Schaumstabilität

Aufschäumen	Parameter	Ansteifen, Erstarren und Erhärten
Wirkungsweise	Ausprägung	Ausprägung
Ausbildung glatter Porenwandungen; Verbesserung der Mobilität der Schaummittelmoleküle	hoch	Wassergehalt mäßig
Rauhigkeit erhöht den inneren Scherwiderstand und somit die Viskosität; hohe Dichte erfordert dicke Lamellen für den Lastabtrag; Hydratationswärme beeinflusst die Wirksamkeit der Zusatzmittel	gering	Anteil Portland- zementklinker mäßig
		gering
		Vermeidung von Entmischungen, Drainage und Schaumzerfall
		Portlandzementklinker beeinflusst den Erstarrens- und Erhärtungsverlauf positiv, chemische Reaktionen und Reaktionsprodukte können jedoch durch Wechselwirkungen die Schaumstabilität beeinträchtigen; hohe Dichte erfordert dicke Lamellen für den Lastabtrag und fördert Drainageeffekte; hohe Anteile bedingen ausgeprägte Schwunderscheinungen
größere Partikel haben geringeren Wasseranspruch, aber erfordern dickere Schaumlamellen und begrenzen so den Luftgehalt	mäßig	Mahlfeinheit der Zemente hoch
		kleine Zwickel zwischen den Zementkörnern werden schneller durch wachsende Kristalle überbrückt; größere Wasserbindung sorgt für stabile Leime

Aufschäumen		Parameter	Ansteifen, Erstarren und Erhärten	
Wirkungsweise	Wirkung		Wirkung	Wirkungsweise
runde Form bewirkt Kugellagereffekt und dadurch meist Verflüssigung	positiv	Flugasche	negativ	Kugellagereffekt verringert die Fließgrenze und vermindert so die Schaumstabilität
Rauhigkeit erhöht den inneren Scherwiderstand und somit die Viskosität, dadurch geringerer Lufteintrag und Erwärmung im mechanischen Aufschäumprozess	negativ	Kalksteinmehl	positiv	Rauhigkeit führt zu höherer Viskosität, höherem Wasserbindevermögen und dadurch stabilerer Leimphase
hohes Wasserbindevermögen bei gleichzeitiger Freisetzung von Zwickelwasser führt je nach Feinheit der Stäube zu unterschiedlichen Einflüssen auf die Viskosität und die damit verbundenen Eigenschaften; feine Feststoffpartikel behindern die Mobilität der Schaummittelmoleküle	indifferent	Silikastäube	positiv	hohes Wasserbindevermögen stabilisiert die Leimphase und reduziert Drainageerscheinungen
sehr hohes Wasserbindevermögen führt zur Erhöhung der Viskosität, Erwärmung im mechanischen Aufschäumprozess und ggf. geringerer Lufteintrag können die Folge sein	negativ	anorg. Stabilisierer (Nanopartikel)	positiv	Erhöhung der Zähigkeit und des Zusammenhaltevermögens und daher Reduzierung von Entmischen, Drainage, Blasenbewegungen

Aufschäumen		Parameter	Ansteifen, Erstarren und Erhärten	
Wirkungsweise	Wirkung		Wirkung	Wirkungsweise
feine Feststoffpartikel behindern die Mobilität der Schaummittelmoleküle	negativ	noch anorg. Stabilisierer (Nanopartikel)		
Ausfüllen von Zwickeln im Bereich der Blasengrenzflächen reduziert den Wasseranspruch zum Erreichen glatter Blasenfüllen	positiv			
Erhöhung der Viskosität und damit verbundener geringerer Lufteintrag	negativ	org. Stabilisierer	positiv	deutliche Erhöhung der Viskosität und dadurch Verminderung von Entmischen, Blasenbewegungen, Drainage
strukturbedingt geringere Beeinflussung der Mobilität der Schaummittelmoleküle als bei Feststoffen	positiv		negativ	verzögernde Effekte auf die Zementhydratation
kleine Moleküle sind mobil und können daher schnell frische Lufteinschlüsse stabilisieren	positiv	Tensid-schaumbildner	eingeschränkt positiv	die Moleküle können durch äußere Einflüsse (mechanisch, elektrochemisch) desorbieren; fehlende Vernetzung, daher weniger ausgeprägte Blasenstabilisierung

Aufschäumen		Parameter	Ansteifen, Erstarren und Erhärten
Wirkungsweise	Wirkung		Wirkungsweise
große Moleküle sind träge und können daher nur langsam frische Luftfeinschlüsse stabilisieren	eingeschränkt positiv	Protein-schaumbildner	Adsorption der Moleküle an den Grenzflächen ist nicht reversibel; große vernetzte Moleküle bilden ein dichtes Netz um die Luftblasen und haben daher eine ausgeprägte stabilisierende Wirkung
mit steigender Dosierung verringern sich die Wege der Schaummittelmoleküle, die zur Stabilisierung neu gebildeter Blasenrenzflächen zurückgelegt werden müssen, das beschleunigt den Stabilisierungsprozess	hoch	Schaummitteldosierung	deutlich verzögernde Wirkung hohe Schaummittelkonzentrationen bewirken eine starke Stabilisierung der Blasen sowie eine Erhöhung der Zähigkeit des Leims; negativ wirkt sich jedoch die zunehmende Verzögerung der Zementhydratation aus
Dispergierung der Feinstoffe und Auflösen von Flockungen; sterische Hinderung erhöht Partikelabstand durch Ausbildung von Wasserfilmen	positiv	Fließmittel auf PCE-Basis	bei normaler Dosierung keine oder nur geringe verzögernde Wirkung; vermeiden Drainage durch Wasseranlagerung
teilweise geringe Wirkung; erheblicher Eingriff in die elektrochemischen Prozesse, möglicherweise mit Auswirkungen auf die Wirksamkeit der Schaummittel	negativ	Betonverflüssiger und andere Fließmittel (Sulfonate etc.)	haben oft deutlich verzögernde Wirkung
Dispergierung der Feinstoffe und Auflösen von Flockungen	positiv		

5 Experimentelle Untersuchungen und deren Auswertung

Das Ziel der experimentellen Untersuchungen liegt in der Untermauerung der theoretisch erarbeiteten Ansätze zu Herstellungsprozessen und Rezepturenentwicklung. Da diese Arbeit erstmals einen umfassenden Überblick über die grundlegenden Zusammenhänge für die Herstellung aufgeschäumter Zementleime liefert, ist eine detaillierte experimentelle Untersuchung aller beschriebenen Einflussfaktoren im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Stattdessen ist das Untersuchungsprogramm darauf ausgelegt, Indizien für die Gültigkeit wesentlicher theoretischer Überlegungen durch Einzelversuche oder kleine Versuchsreihen zu liefern. Daher wird bewusst darauf verzichtet, einzelne Einflüsse durch aufwändige Parameterstudien im Detail zu untersuchen. Genauere Untersuchungen einschließlich der Optimierung der Aufschäumtechnik und umfangreicher Variationen der Ausgangsstoffe und ihrer Dosierungen, bleiben also der weiteren Forschung überlassen.

5.1 Versuchskonzeption

Wegen der schon beschriebenen sehr großen Anzahl unterschiedlicher Einflussparameter auf den aufgeschäumten Zementleim ist es im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, alle Einflüsse inklusive möglicher Wechselwirkungen systematisch zu ermitteln und zu quantifizieren. Daher wurde aus den Ergebnissen umfangreicher Tast- und Vorversuche, die hier nicht im Einzelnen dokumentiert sind, und den Ergebnissen der theoretischen Überlegungen aus Kapitel 4 eine Ausgangsrezeptur entwickelt. Auf deren Grundlage werden Einflüsse beschrieben und bewertet, die durch den Austausch oder die Dosierungsveränderung einzelner Stoffe entstehen. Die Beschreibung der Eigenschaften des frischen Zementschaums stellt dabei ein eigenes Problem dar. Neben den aus der Biontechnologie bekannten Kenngrößen wie Ausbreitfließmaß, Rohdichte und einer

Augenscheinprüfung der Leimstabilität spielt bei der Beschreibung der Zementschäume insbesondere die Porenstruktur eine Rolle. Diese unterliegt jedoch bis zum Erstarren des Leims einer ständigen Veränderung und lässt sich erst an der erhärteten Probe durch aufwändige optische Verfahren bestimmen. Um diesem Problem zu begegnen, wurde für alle frischen Zementschäume eine möglichst ähnliche, feine Porenstruktur angestrebt. Dieses konnte augenscheinlich durch die Verwendung eines selbst konstruierten Schaumgenerators erreicht werden, der die bereits im Intensivmischer vorgeschäumten Leime unter weiterer Erhöhung des Luftgehalts in einem statischen Mischer homogenisierte. Mit der resultierenden, für alle Zementschäume ähnlichen und feinen Porenstruktur kann die Veränderung des Schaums während des Erstarrens und Erhärtens anhand der im festen Schaum ermittelten Porenstruktur bewertet werden.

Die Verwendung des Schaumgenerators, der dem Prinzip der statischen Mischer folgt, erfordert jedoch weitgehend einheitliche, gleichbleibende Eigenschaften des Mischguts, da Mischer und Mischgut aufeinander abzustimmen sind. Beim Wechsel eines Ausgangsstoffes oder einer wesentlichen Veränderung seiner Dosierung ist diese Eigenschaftstreue in der Regel nicht gegeben. Daher ist der Spielraum der Rezepturveränderungen stark eingeschränkt oder es müssen mehrere teils gegenläufige Parameter verändert werden. Angesichts der Sensibilität des Systems Zementschaum führt Letzteres dazu, dass die Rezepturen nicht mehr vergleichbar sind. Daher sind die untersuchten Bandbreiten in der Dosierung der Stoffe oft gering, was die Aussagekraft der Ergebnisse teilweise einschränkt.

5.2 Aufschäumverfahren

Für alle durchgeführten Versuche erfolgte die Leimherstellung unter Verwendung eines Intensivmischers. Auf Grund der hohen erreichbaren Mischintensität und der Bauart des Mixers wurde der Mischprozess von einem erheblichen Lufteintrag in die Mischung begleitet. Unter Verwendung von Schaumbildnern konnte so allein durch den Mischprozess eine aufschäumende Wirkung erreicht werden. Darüber hinaus kam bei den meisten Versuchen zusätzlich ein selbstentwickelter Schaumgenerator zum Einsatz. In diesem wurde der zuvor im Intensivmischer hergestellte und vorgeschäumte Leim in einem weiteren Verfahrensschritt zusätzlich mit Luft versetzt und hinsichtlich der Porenstruktur homogenisiert.

5.2.1 Intensivmischer

Verwendetes Gerät

Im Rahmen dieser Arbeit kam ein Intensivmischer der Fa. Eirich zum Einsatz. Dieser ist so konzipiert (vgl. Abbildung 4.12 und 5.1), dass sich sowohl der Teller mit dem Mischgut dreht als auch ein zusätzlicher Wirbler, der exzentrisch angeordnet ist. Außerdem ist der Mischer um ca. 30° gekippt und im oberen Bereich mit einem fest installierten Wandabstreifer versehen, wodurch eine zusätzliche Schwerkraftkomponente in den Mischprozess eingebracht wird. Die Mischersteuerung erlaubt es, sowohl die Drehgeschwindigkeit von Teller und Wirbler als auch die Drehrichtung des Wirblers zu beeinflussen.



Abbildung 5.1: Intensivmischer, Quelle Fa. Eirich, verändert

Der Wirbler ist als Kreuzbalkenrührer mit vier kreuzweise übereinander liegenden Rührarmen ausgeführt (vgl. Abbildung 5.2). Da die Rührarme leicht schräg gestellt sind, wird neben einer radialen auch eine ausgeprägte axiale Mischwirkung erreicht. Das ermöglicht einen Lufteintrag durch Ausbildung einer Trombe, wie in Abschnitt 2.5.1 erläutert.

Voruntersuchungen zum Lufteintrag

Da die Strömungsverhältnisse im Mischer den Lufteintrag maßgeblich mitbestimmen (vgl. Abschnitt 2.5), wurden zunächst unterschiedliche Mischereinstellungen hinsichtlich Drehgeschwindigkeiten und Drehrichtungen anhand der



Abbildung 5.2: Mischwerkzeug des Intensivmischers

resultierenden Leimrohddichte verglichen. Die Ergebnisse von jeweils zwei gleichartigen Versuchen sind in Tabelle 5.1 dargestellt.

Trotz großer Schwankungsbreiten der Messwerte weisen die Ergebnisse auf einen nennenswerten Einfluss des Mischprogramms hin. Das Mischprogramm M2, bei dem Wirbler und Topf beide mit hoher Drehzahl und gleicher Drehrichtung arbeiten, erzielt deutlich den höchsten Lufteintrag. Erwartungsgemäß ist der Lufteintrag bei gleicher Drehrichtung und geringeren Geschwindigkeiten geringer. Bei entgegengesetzter Drehrichtung ist der Lufteintrag erheblich weniger effektiv. Es muss davon ausgegangen werden, dass die Ausbildung einer stabilen Trombe um die Welle wegen der chaotischen Strömungsverhältnisse nicht möglich ist.

Ein systematischer Einfluss des Mischprogramms auf das Ausbreitfließmaß ist nicht zu erkennen. Hinsichtlich der Dispergierung der Feststoffe sind also keine entscheidenden Unterschiede zu berücksichtigen.

Die folgenden Versuche wurden alle mit dem Mischprogramm M2 durchgeführt, um ein möglichst effizientes Aufschäumen zu erreichen.

5.2.2 Schaumgenerator

Der Schaumgenerator wurde im Rahmen dieser Arbeit mit dem Ziel konstruiert, Zementleime direkt aufzuschäumen. Um ein Abbinden des Zementleims

Tabelle 5.1: Ergebnisse der Vorversuche zu den Mischeinflüssen (negative Vorzeichen weisen auf gegenläufige Drehrichtung hin)

Mischprogramm	Mischstufen		Ausbreitfließmaß <i>cm</i>	Rohdichte <i>kg/dm³</i>
	Wirbler	Topf		
M1	1	1	31,0	1,156
			28,5	1,215
	Mittelwert		29,75	1,186
M2	2	2	27,5	1,080
			29,0	1,022
	Mittelwert		28,25	1,051
M3	-1	1	28,5	1,133
			29,5	1,096
	Mittelwert		29,0	1,115
M4	-2	2	28,0	1,125
			33,5	1,131
	Mittelwert		30,75	1,128

im Schaumgenerator zu vermeiden, wurde die Konstruktion so ausgelegt, dass sie nach jedem Gebrauch weitgehend zerlegt und gereinigt werden kann. Der dadurch erforderliche modulare Aufbau hat zusätzlich den Vorteil, dass sowohl Modifikationen am Gerät als auch der Austausch einzelner Verschleißteile mit geringem Aufwand durchgeführt werden können.

Aufbau und Funktionsweise des entwickelten Schaumgenerators

Der Aufbau des Schaumgenerators ist in Abbildung 5.3 schematisch dargestellt. Sein Betrieb setzt den Anschluss an eine Druckluftversorgung voraus, wie sie in vielen Laboren vorhanden ist. Alternativ ist auch der Betrieb über einen separaten Kompressor oder eine Druckflasche möglich. Da der Schaumgenerator nicht über ein eigenes Rührwerk verfügt, ist ein Vormischen des Zementleims erforderlich.

Der vorgemischte Zementleim wird chargenweise in einen Druckbehälter eingebracht, dessen Fassungsvermögen sich an dem verfügbaren Mischervolumen orientiert. Durch eine regelbare Beaufschlagung des Druckbehälters mit Druckluft (bis ca. 5 bar) wird der Zementleim über ein Steigrohr aus dem Behälter gefördert. Nach kurzer Fließstrecke tritt der Leim in eine Reaktorstrecke (siehe Abbildung 5.4) ein. Diese besteht aus einem mit Stahlkugeln einheitlichen Durchmessers (4 mm) gefüllten Rohrabschnitt, in dessen oberem Bereich sich

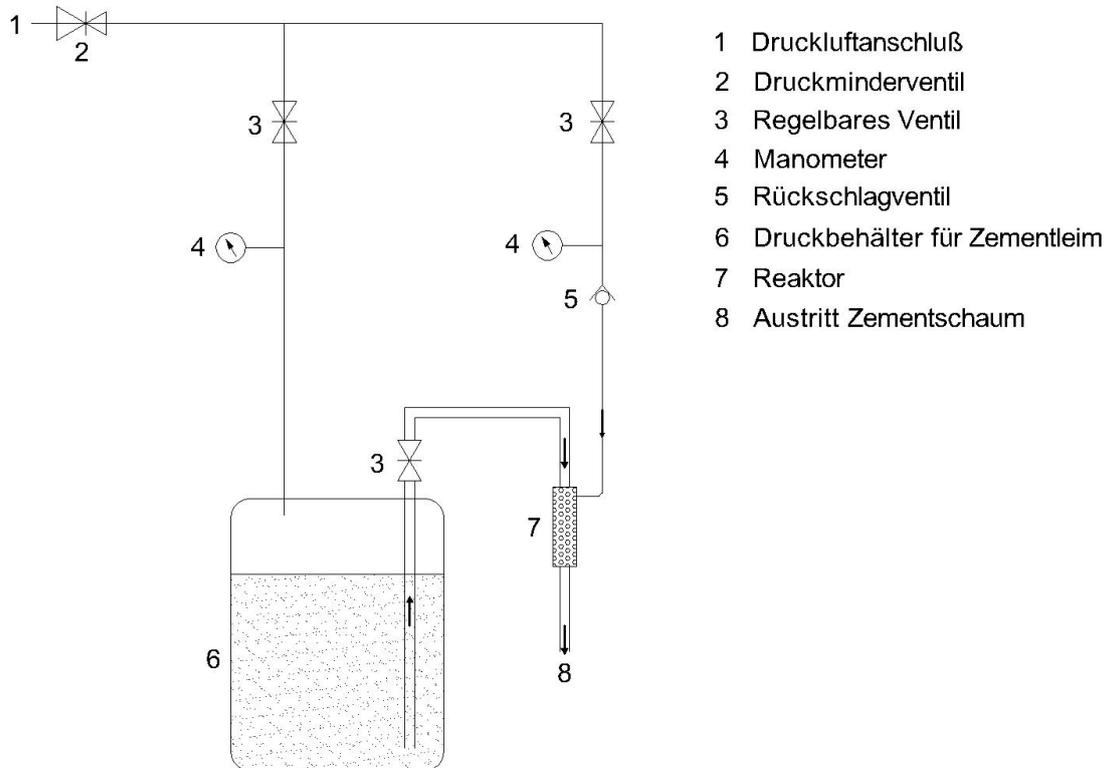


Abbildung 5.3: Prinzipskizze des Schaumgenerators (nicht maßstäblich)

eine zusätzliche, separat steuerbare Luftzufuhr befindet. Durch die zusätzliche Luftzufuhr kann der Luftgehalt des Zementschaums weiter erhöht werden. Die Reaktorstrecke übernimmt die Funktion eines statischen Mixers und sorgt für die Dispergierung der Luft im Leim sowie für eine Homogenisierung des Leim-Luft-Gemisches. Ihre Geometrie (Kugeldurchmesser, Länge) ist auf die Eigenschaften der vorgemischten Leime abgestimmt. Ein Austreten der Kugeln aus der Reaktorstrecke wird durch ein grobes Gitter an deren Ende verhindert. Der aufgeschäumte, homogenisierte Leim gelangt vom Ende der Reaktorstrecke durch einen Schlauch weiter zur Einbaustelle. Um die Randbedingungen des Aufschäumverfahrens im Schaumgenerator für vergleichende Versuche an unterschiedlichen Leimrezepturen möglichst konstant zu halten, wurden in Druckbehälter und zusätzlicher Luftzufuhr stets Drücke von ca. 4 bzw. 5 bar eingestellt.

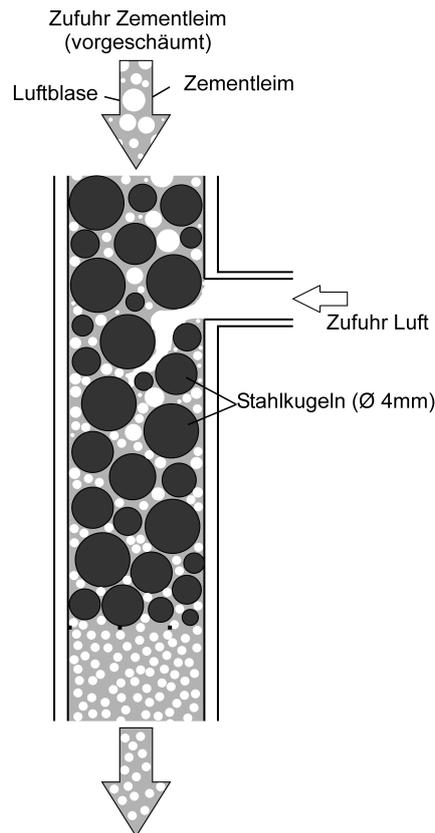


Abbildung 5.4: Schnitt durch die Reaktorstrecke des Schaumgenerators

Anwendungsgrenzen des Schaumgenerators

Für den Schaumgenerator als statischer Mischer ist eine Abstimmung der Zementleimeigenschaften auf den Mischer erforderlich. Weist der vorgeschäumte Zementleim nicht die für einen ordnungsgemäßen Mischvorgang nötigen Eigenschaften auf, kommt es zu Störungen. Außerdem kann auch der zusätzliche Lufteintrag durch die Eigenschaften des vorgeschäumten Zementleims beeinflusst werden. Auch dadurch kommt es zu Beeinträchtigungen der Funktionsweise des Schaumgenerators.

Die Fehlfunktionen des Schaumgenerators lassen sich in drei verschiedene Szenarien unterteilen, die in Abbildung 5.5 schematisch dargestellt sind:

- Verstopfen der Reaktorstrecke
- ungenügender Lufteintrag
- ungenügende Dispergierung der Luft durch Ausbildung von Luftkanälen

Ein vollständiges Verstopfen der Reaktorstrecke ist in der Regel auf einen zu steifen, nicht ausreichend fließfähigen Leim zurückzuführen. Durch die relativ große Oberfläche der Kugeln in der Reaktorstrecke treten erhebliche Reibungskräfte auf, die durch den aufgebrachtten Druck nicht überwunden werden können. Kommt es nicht zu einer vollständigen Verstopfung, sondern nur zu einer erheblichen Reduzierung der Fließgeschwindigkeit, können je nach Druckverhältnis zwischen Schaum und zusätzlicher Luftzufuhr auch die in Abschnitt 4.2.3 beschriebenen Pfropfenströmungen entstehen.

Das Auftreten eines ungenügenden Lufteintrags kann zwei Ursachen haben. Zum einen kann der gewählte Druck in der Luftzuführung zum Reaktor zu gering sein, so dass der Leim in die Luftzuführung drängt. Entsprechend den Gleichungen 2.16 und 2.17 ist es jedoch auch möglich, dass eine sehr hohe Leimviskosität mit einem starken inneren Zusammenhaltevermögen der einströmenden Luft einen so großen Widerstand entgegengesetzt, dass im Reaktor kein oder nur ein vernachlässigbarer zusätzlicher Lufteintrag erfolgt. Dem kann in begrenztem Umfang durch eine Erhöhung der Drucks in der Luftzuführung entgegengewirkt werden. Bei den viskositätsbedingt meist sehr niedrigen Fließgeschwindigkeiten des Zementleims bzw. -schaums erhöht sich dadurch jedoch auch die Gefahr von Pfropfenströmungen.

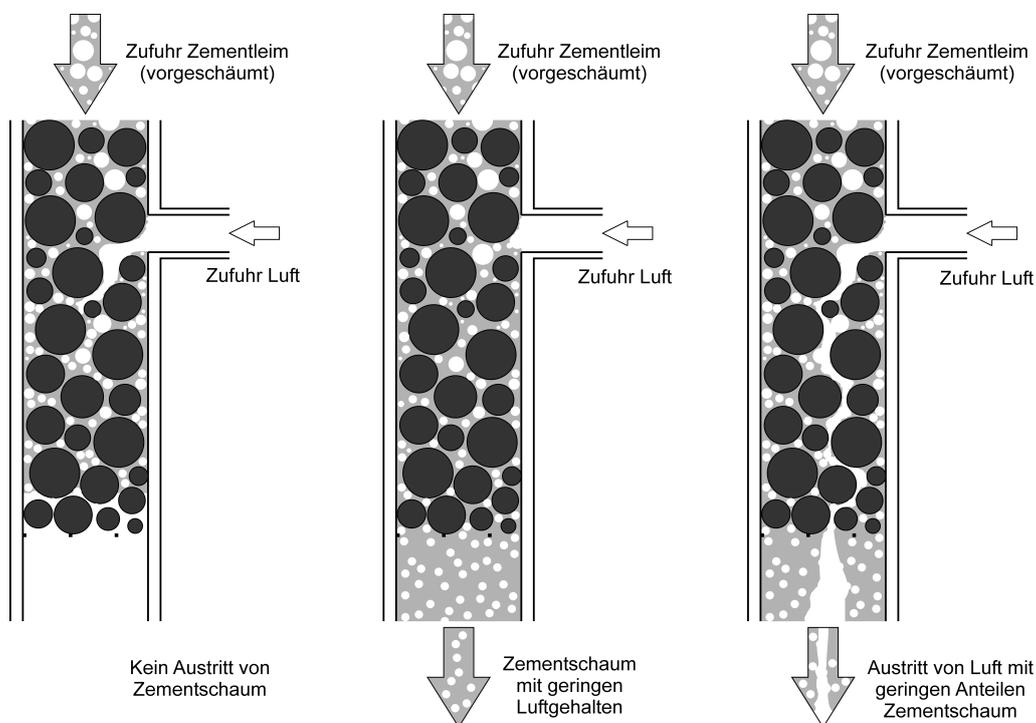


Abbildung 5.5: Versagensarten des Schaumgenerators: links: Verstopfen; mitte ungenügender Lufteintrag; rechts Ausbildung von Luftkanälen

Für den normalen Betrieb des Schaumgenerators ist ein mäßig ausgeprägtes Strahlgasen (vgl. Abschnitt 2.5.2, Abbildung 2.26) erforderlich, um ein ausreichendes zusätzliches Luftvolumen in den Schaum einzubringen. Bei sehr hohem Luftdruck in der Zuleitung und weichen Leimkonsistenzen mit geringer Zähigkeit kann es zu stark ausgeprägtem Strahlgasen bis hin zur Ausbildung von Luftkanälen durch den gesamten Reaktor bis zur Austrittsstelle kommen (Abbildung 5.5 rechts). In diesen Kanälen wird der Luft kein nennenswerter Widerstand mehr entgegengesetzt, so dass sie sehr hohe Strömungsgeschwindigkeiten erreicht. In der Regel schließen sich diese Luftkanäle schnell wieder, da es in ihnen zu einem starken Druckabfall kommt, sobald sie das Reaktorende erreichen und sich ein nahezu ungehinderter Luftstrom einstellt. Der höhere Leimdruck sorgt dann für das Schließen des Luftkanals. Im Versuch macht sich dieses Verhalten durch einen Wechsel von Luftaustritt und Schaumaustritt aus dem Generator bemerkbar. Ist der Leimdruck zu gering, so dass der Leim nur langsam seitlich in den Luftkanal einfließt, wird er immer wieder von dem Luftstrom mitgerissen, bevor sich der Luftkanal schließen kann. In diesem Fall weist der Schaumgenerator einen permanenten starken Luftausstoß auf, der nur gelegentlich von Schaumfetzen begleitet wird. Diese Schaumfetzen entstehen während des weiteren Transports vom Reaktor bis zum Einbau. Die relativ geringen den Reaktor durchfließenden Schaummengen werden von dem starken Luftstrom auseinandergerissen was oft zur Zerstörung des Schaums führt. Treten derartige Luftkanäle bei Leimen mit deutlicher Neigung zum Wasserabsondern bzw. Entmischen auf, wirken sie ähnlich dem Prinzip der Wasserstrahlpumpe und entziehen dem Leim freies Wasser. Das führt zu einem Ansteifen des im Reaktor verbleibenden Leimanteils, was den Schaumfluss z.T. vollständig unterbindet.

Somit muss der im Schaumgenerator zu verarbeitende (vorgeschäumte) Leim ausreichend fließfähig sein, um ein Verstopfen des Reaktors durch Korn-zu-Korn-Reibung im Leim und Reibung an den Reaktoroberflächen zu verhindern. Er muss eine ausreichende Zähigkeit aufweisen, um unter den gegebenen Druckverhältnissen die Bildung von Luftkanälen zu verhindern, darf jedoch nicht so zäh sein, dass er der einströmenden zusätzlichen Luft einen zu hohen Widerstand entgegengesetzt. Weiterhin dürfen keine ausgeprägten Entmischungserscheinungen auftreten. Es ergibt sich also ein relativ enger Eigenschaftsbereich, in dem Zementleime bei sonst gleichbleibenden Bedingungen mit dem Schaumgenerator verarbeitbar sind. Daraus folgt, dass Rezepturveränderungen mit dem Ziel vergleichender Untersuchungen auf geringe Veränderungen des Eigenschaftsprofils der Leime beschränkt bleiben müssen.

5.3 Einflüsse der Leimkomponenten auf das Schäumungsverhalten und die Schaumstabilität

Wie bereits dargestellt, waren die Schwankungen der Eigenschaften des vorgeschäumten Zementleims durch die Schaumstabilität und die Verarbeitbarkeit im Schaumgenerator sehr begrenzt. Daher wurde in Vorversuchen und auf Grundlage der theoretischen Überlegungen eine robuste Rezeptur entwickelt, die die erforderlichen Eigenschaften relativ zuverlässig auch noch bei geringen bis mittleren Abweichungen von der Ausgangsrezeptur erreicht. Die Eckwerte der Rezeptur sind in Tabelle 5.2 dargestellt. In Anlehnung an die traditionelle Darstellung des w/z-Wertes als Quotient zweier Massen und zur Vereinfachung der Versuchsvorbereitung bzw. -durchführung wurden die Stoffmengen für alle Rezepturen als Massen vorgegeben. Beim Austausch von Ausgangsstoffen mit unterschiedlichen Rohdichten wie auch bei variierten Dosierungen einzelner Stoffe, kam es daher zu Verschiebungen ihrer Volumenanteile und Veränderungen des Gesamtvolumens. Bei den Rezeptureckwerten handelt es sich deshalb um Näherungswerte, die in Abhängigkeit von der Dichte der jeweils verwendeten Ausgangsstoffe geringfügig variieren.

Tabelle 5.2: Eckdaten der verwendeten Grundrezeptur für die aufgeschäumten Zementleime

Stoff	Masse in g je dm ³ unaufgeschäumter Leim
Zement	970
Zugabewasser	415
Füller (Flugasche / Kalksteinmehl / Silikastaub)	128
anorganischer Stabilisierer (Nanosilikasuspension)	64
organischer Stabilisierer (pulverförmige Methylcellulosen)	1,6
Fließmittel	52
Schaummittel	128
	1758,6

Die beschriebene Grundrezeptur weicht vor allem in Bezug auf die Zusatzmitteldosierungen erheblich von herkömmlichen Leimrezepturen in der Betontechnologie ab. Während die derzeit gültige Norm für die Betonherstellung [30, 31] die Verwendung von Kombinationen unterschiedlicher Zusatzmittel auf 60 g/kg Zement für Normalbeton bzw. 80 g/kg Zement für hochfeste Betone begrenzt,

wurden hier Zusatzmittelgehalte von ca. 250 g/kg Zement verwendet. Den größten Anteil machen dabei die organischen Zusatzmittel, d.h. die Schaummittel, Fließmittel und organischen Stabilisierer aus. Die Ursache dafür liegt in den für das Aufschäumen erforderlichen und für Zementleime außergewöhnlich hohen Wassergehalten, die unter Berücksichtigung der Wasseranteile in den Zusatzmitteln zu w/z-Werten zwischen 0,55 und 0,6 führen. Auf den Einfluss des Wassergehalts wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen. Normale Zementleime, wie sie z.B. zur Prüfung von Zementen verwendet werden [29], weisen lediglich w/z-Werte von ca. 0,25 auf und sind bei höheren w/z-Werten, wie sie hier erforderlich sind, nicht mehr stabil, sondern zeigen ausgeprägte Entmischungerscheinungen. Durch die Zugabe erheblicher Mengen organischer Bestandteile ist es jedoch möglich, die Zementleime trotz hoher Wassergehalte weitgehend entmischungstabil herzustellen. Darüber hinaus weisen die hier verwendeten Leime eine hohe Robustheit gegenüber Schwankungen der Eigenschaften und der Dosierung der Ausgangsstoffe auf, was angesichts der Sensibilität der Schäume hinsichtlich Entmischungerscheinungen (z.B. in Bezug auf Drainage) für eine vergleichende Untersuchung unabdingbar ist. Dadurch verlieren zwar die zu untersuchenden stofflichen Einflüsse ihre Signifikanz, es ist jedoch nur so möglich, Einflüsse unterschiedlicher Ausgangsstoffe oder Dosierungen bei sonst unveränderten Rezepturen vergleichend darzustellen. Abweichungen von der normalen Wirkung der Zusatzmittel können durch sehr hohe (Über-)Dosierung auftreten. Auf Grund der veränderten Anforderungen an die Zementleime sind diese jedoch in der speziellen Betontechnologie der aufgeschäumten Zementleime als Regelfall anzusehen und schränken die Aussagekraft der Ergebnisse somit nicht ein.

Die Bewertung der Einflüsse der Ausgangsstoffe auf das Aufschäumen erfolgt auf Grundlage der erzielten Schaumrohrdichten im frischen Zustand, getrennt jeweils nach dem Aufschäumen im Zwangsmischer und dem Aufschäumen im Schaumgenerator. Zur Ermittlung der Schaumrohrdichte nach dem Aufschäumen im Zwangsmischer wurde der Zementschaum in einen biegesteifen, wasserdichten Behälter mit einem definierten Volumen von 1 dm³ eingebracht und gewogen. Das Einbringen des Schaums erfolgt ohne Verdichtung, um ein Entlüften zu vermeiden. Es war darauf zu achten, dass sich beim Einbau keine Lufteinschlüsse (vgl. Abbildung 4.6) bilden und der Behälter vollständig gefüllt ist. Über den Behälterrand überstehender Schaum wurde mit einem Stahllineal abgezogen. Aus der ermittelten Schaummasse und dem definierten Behältervolumen wurde die Schaumrohrdichte ermittelt. Nach dem Aufschäumen im Schaumgenerator wur-

den bei sonst gleichem Vorgehen die Schalungen der hergestellten Probekörper als Gefäß verwendet, so dass direkt die Rohdichte der hergestellten Zementschaumprismen ermittelt wurde. Die Bestimmung der Rohdichte der erhärteten Schäume erfolgte im Alter von 28 d nach Klimalagerung bei 20°C und ca. 65 % rel. Feuchte an den hergestellten Prismen. Schwierigkeiten ergaben sich hier z. T. bei der Ermittlung des Volumens. Länge und Breite der Prismen konnten mit einem Messschieber auf 0,1 mm genau bestimmt werden. Die Oberfläche der Prismen wies jedoch insbesondere bei schlechter Schaumstabilität durch Zusammensacken des Schaums eine deutliche Reliefbildung auf, die eine exakte Höhenbestimmung der Prismen erschwerte. Daher konnte die mittlere Prismenhöhe in einigen Fällen auf Grundlage der gemessenen maximalen Prismenhöhe nur auf ein bis zwei Millimeter genau abgeschätzt werden. So kann es in Einzelfällen zu ungenauen oder fehlerhaften Rohdichtebestimmungen am erhärteten Zementschaum gekommen sein.

Die Schaumstabilität wurde durch einen Vergleich der Frisch- und Festroh-dichten der hergestellten Probekörper sowie anhand ihrer äußeren Verformungen bewertet. Darüber hinaus erfolgte z.T. eine Auswertung der Porenstruktur/Porengrößenverteilung. Ausgehend von der Annahme einer relativ homogenen, feinen und geschlossenzelligen Porenstruktur beim Verlassen des Schaumgenerators konnte die Veränderung des Leims während des Ansteifens und Erhärtens anhand der Porenstruktur der festen Zementschäume dargestellt werden.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Untersuchungen zu einzelnen Leimkomponenten dargestellt und mit den theoretischen Überlegungen aus Kapitel 4 verglichen. Um eine Zuordnung der ermittelten Einflüsse zu einem konkreten Rezepturparameter (Stoff oder Dosierung) zu ermöglichen, wurde, soweit nichts anderes angegeben ist, für die einzelnen Versuchsreihen nur der zu untersuchende Parameter variiert. Eine weitere Anpassung der Zusammensetzung der Leime oder von Randbedingungen der Versuche (Mischdauern, Luftdrücke im Schaumgenerator etc.) erfolgte nicht.

5.3.1 Wassergehalt

Abbildung 5.6 zeigt die Veränderung der Rohdichten von zwei Rezepturen mit unterschiedlichen Tensidschaummitteln bei variierenden Wassergehalten. Eine Erhöhung des Wassergehalts führt tendenziell zu einer Reduzierung der Rohdichten. Dieses gilt sowohl für die Rohdichten nach dem Aufschäumen im Zwangsmischer als auch nach dem Aufschäumen im Schaumgenerator und im erhärteten Zustand nach 28 Tagen.

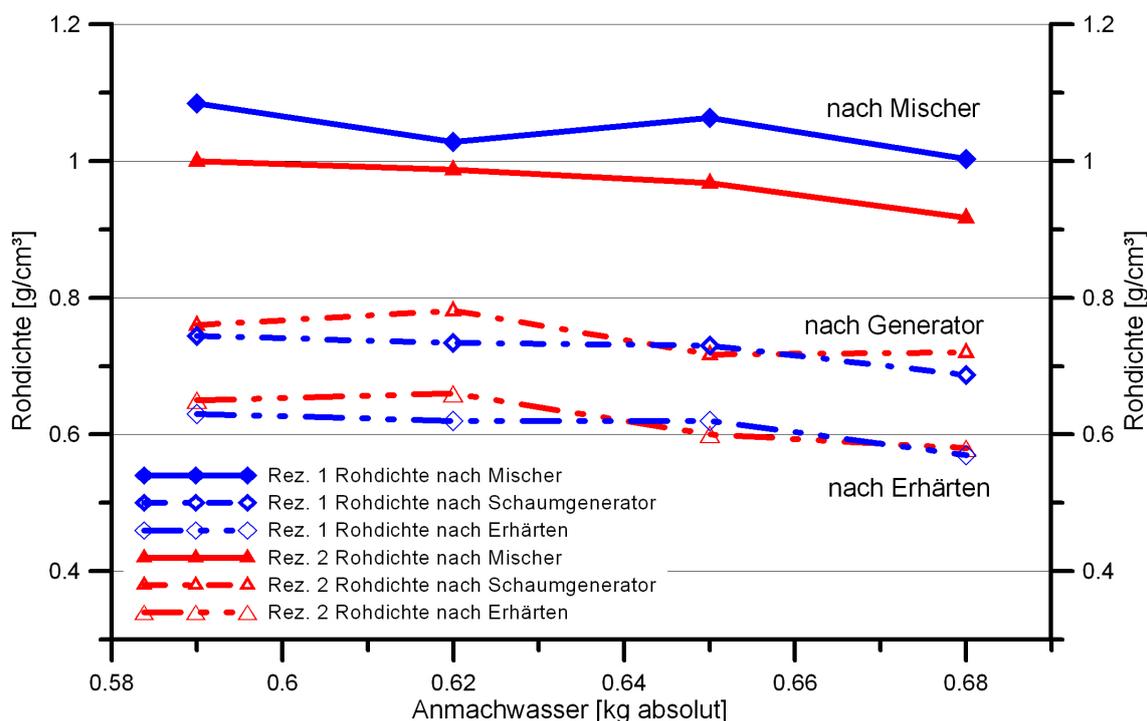


Abbildung 5.6: Gegenüberstellung von Wassergehalt und Rohdichte bei zwei Rezepturen mit unterschiedlichen Schaummitteln

Als Ursachen dafür kommen zwei Aspekte in Frage, ein erhöhter Lufteintrag mit steigendem Wassergehalt und eine Verringerung der Leimdichte durch einen höheren Wasseranteil. Da Wasser von allen Leimkomponenten die geringste Dichte hat, führt ein erhöhter Volumenanteil des Wassers zwangsläufig zu einer Reduzierung der Leimdichte. Im vorliegenden Fall ergeben sich für die Leime mit minimalem und maximalem Wassergehalt Leimdichten von $1,78 \text{ g/cm}^3$ bzw. $1,74 \text{ g/cm}^3$. Bereinigt man die gemessenen Rohdichtewerte anteilig um diese wassergehaltsbedingte Veränderung der Leimdichte zeigt sich insbesondere für die Rohdichte nach dem Mischen im Zwangsmischer weiterhin eine deutliche Abnahme. Somit wird deutlich, dass hier zusätzlich zur Verringerung der Leimrohndichte auch ein erhöhter Lufteintrag erfolgt. Dieses bestätigt die Über-

legungen aus Abschnitt 4.2.2 wonach ein höherer Wassergehalt die Ausbildung stabiler Poren beim Aufschäumen begünstigt.

Bei der Weiterverarbeitung des Leims im Schaumgenerator ist der positive Einfluss höherer Wassergehalte auf die Schaumrohddichten etwas geringer ausgeprägt, was sich in der geringeren Veränderung der gemessenen Rohdichtewerte widerspiegelt. Doch auch hier ergibt sich zusätzlich zur Veränderung der Leimrohddichte ein geringfügig verstärkter Lufteintrag bei höheren Wassergehalten. Eine Erklärung für die schwächere Ausprägung des Effekts liegt in den unterschiedlichen Randbedingungen der statischen und dynamischen Mischer. Während der dynamische Mischer auf Grund der hohen Scherbelastungen und der Möglichkeit des Entlüftens auf eine schnelle Stabilisierung der eingeführten Luftblasen angewiesen ist, wird dem statischen Mischer die Luft gezielt separat zugeführt und kann während des Mischvorgangs nicht entweichen. Wegen der relativ geringen Mischgutgeschwindigkeit im statischen Mischer steht daher eine längere Zeit für die Stabilisierung der Blasen zur Verfügung, wodurch die Mobilität der Schaummittelmoleküle eine untergeordnete Rolle spielt. Da aber gerade diese Mobilität der Schaummittelmoleküle vom Wassergehalt beeinflusst wird, ist der Einfluss des Wassergehalts auf den Lufteintrag im Schaumgenerator geringer. Die Kurvenverläufe der Rohddichten für die erhärteten Schäume ähneln denen der frischen Schäume aus dem Schaumgenerator. Sie weisen jedoch eine deutlich geringere Rohddichte auf und der Einfluss des Wassergehaltes ist geringfügig ausgeprägter. Diese Veränderungen sind auf die Austrocknung der Schäume zurückzuführen. Während die im frischen Zustand eingebrachten Luftgehalte erhalten bleiben, hinterlässt das Wasser bei Austrocknung des erhärteten Schaums weitere Porenräume, wodurch die Rohddichte sinkt. Bei höheren Wassergehalten sind diese Porenräume in der Summe größer, was zu einem stärkeren Rückgang der Rohddichte führt.

Eine stärkere Variation des Wassergehalts war bei sonst unveränderten Randbedingungen nicht sinnvoll, da höhere Wassergehalte zu deutlichen Entmischungserscheinungen bei den Leimen führen, was sowohl die Verarbeitbarkeit als auch die Schaumstabilität massiv beeinträchtigt. Geringere Wassergehalte verändern die rheologischen Eigenschaften der Leime derart, dass eine Verarbeitbarkeit mit dem verwendeten Schaumgenerator ausgeschlossen ist.

5.3.2 Zemente

Die Einflüsse der Zementart auf die Schaumherstellung und Schaumstabilität sind vielfältig. Einerseits beeinflusst die chemische Zusammensetzung Parameter wie die Wirkungsweise und Wirksamkeit der Zusatzmittel sowie das Erstarrungsverhalten. Andererseits wirken die Korngrößenverteilung und Oberflächenbeschaffenheit als physikalische Parameter unmittelbar auf den Wasseranspruch des Leims, die Fließeigenschaften und das Zusammenspiel mit Zusatzstoffen. Bei der großen Bandbreite unterschiedlicher Zemente war eine repräsentative Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Um dennoch ein möglichst breites Eigenschaftsspektrum abzudecken, wurden mit einem CEM III/B 52,5 (Z 1), einem neuartigen Schnellzement (CEM I 52,5 R (fc), Z 2) und einem herkömmlichen CEM I 52,5 R (Z 3) von verschiedenen Herstellern drei Zemente ausgewählt, die nach Art, Herkunft und Zusammensetzung der Ausgangsstoffe und des Portlandzementklinkeranteils sehr unterschiedlich sind. Zusätzlich wurden, abgestimmt auf den herkömmlichen CEM I 52,5 R, ein CEM I 42,5 R (Z 4) und ein CEM I 32,5 R (Z 5) aus dem gleichen Werk und den gleichen Rohstoffvorkommen untersucht, um den Einfluss unterschiedlicher Zementfestigkeitsklassen bzw. Mahlfeinheiten zu überprüfen. Alle Zemente wurden hinsichtlich ihrer Eignung für aufgeschäumte Zementleime miteinander verglichen.

Zur Charakterisierung der Zementeigenschaften wurden die jeweiligen Korngrößenverteilungen ermittelt und in Abbildung 5.7 dargestellt. Darüber hinaus zeigt Tabelle 5.3 Auszüge aus Analysen der drei herkunftsgleichen CEM I-Zemente. Bei diesen Daten handelt es sich überwiegend um Herstellerangaben zu den Monatsmittelwerten der werkseigenen Produktionskontrolle. Diese Daten geben somit nicht die exakte Zusammensetzung der jeweils verwendeten Liefercharge wieder, verdeutlichen jedoch die prinzipiellen Übereinstimmungen bzw. Unterschiede zwischen den Zementen.

Da es durch die unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften der fünf Zemente in den meisten Fällen nicht möglich war, mit allen fünf Zementen gleiche Rezepturen ohne weitere Anpassungen auszuführen, erfolgte ein direkter Vergleich aller Zemente nur anhand einer Rezeptur. Darüber hinaus wurden mit zwei weiteren Rezepturen die Zemente der Festigkeitsklasse 52,5 (Z 1 bis Z 3) sowie die vier CEM I-Zemente (Z 2 - Z 5) verglichen. Die Ergebnisse dieser Vergleichsversuche sind in Abbildung 5.8 dargestellt. Teilweise ergeben sich weitere Vergleichsmöglichkeiten aus den Versuchen zur Schaummitteldosierung (vgl. Abbildung 5.14).

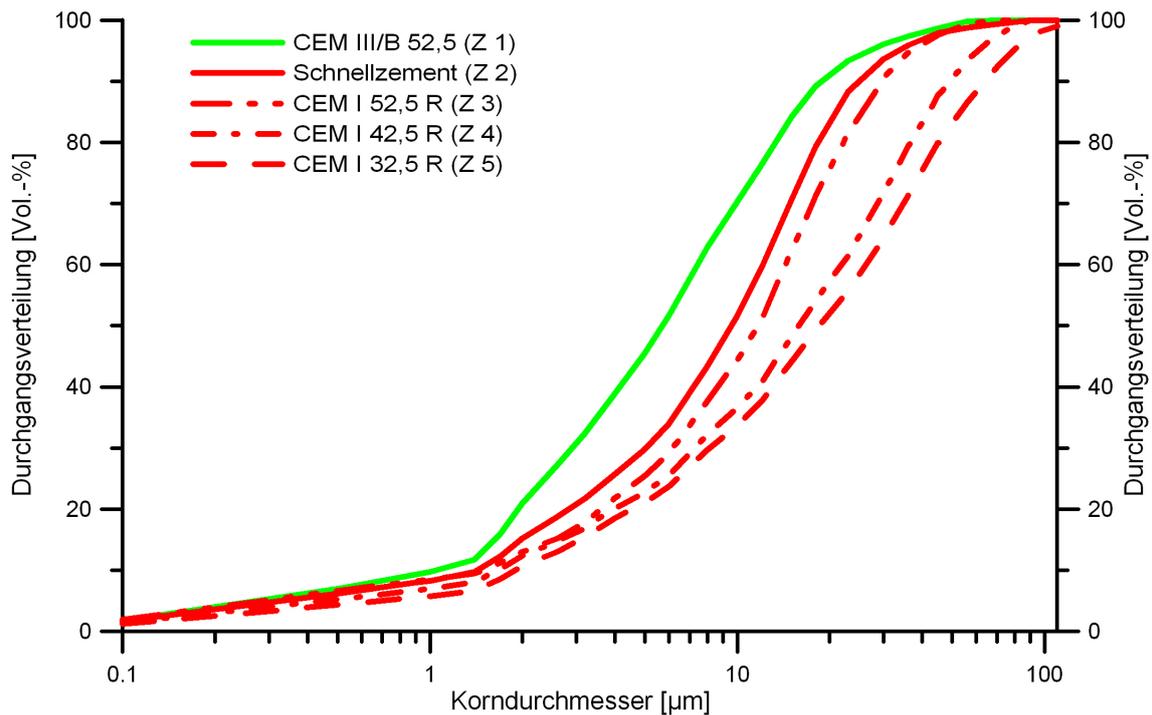


Abbildung 5.7: Kornbänder der verwendeten Zemente

Tabelle 5.3: Vergleich von chemischen und physikalischen Eigenschaften der herkunftsgleichen CEM-I-Zemente

		CEM I 32,5 R (Z 5)	CEM I 42,5 R (Z 4)	CEM I 52,5 R (Z 3)
Chemische Analyse				
Glühverlust	[M.-%]	1,59	1,22	0,74
Unlösl. Rückstand	[M.-%]	0,60	0,73	0,12
SiO ₂	[M.-%]	21,44	21,42	21,33
Al ₂ O ₃	[M.-%]	5,34	5,30	5,30
Fe ₂ O ₃	[M.-%]	2,60	2,58	2,56
CaO	[M.-%]	65,29	65,33	65,26
MgO	[M.-%]	1,07	1,06	1,05
SO ₃	[M.-%]	3,20	3,29	3,60
Chlorid	[M.-%]	0,06	0,05	0,01
Kalkstandard		92,7	92,8	92,7
C ₃ S	[M.-%]	54,6	54,8	54,2
C ₂ S	[M.-%]	20,3	20,1	20,3
C ₃ A	[M.-%]	9,7	9,7	9,7
C ₃ AF	[M.-%]	7,9	7,9	7,8
Mechanische Daten				
Rohdichte	[g/cm ³]	3,16	3,18	3,14
Spez. Oberfläche	[cm ² /g]	2754	3441	5388
Wasseranspruch	[M.-%]	24,9	26,6	31,8

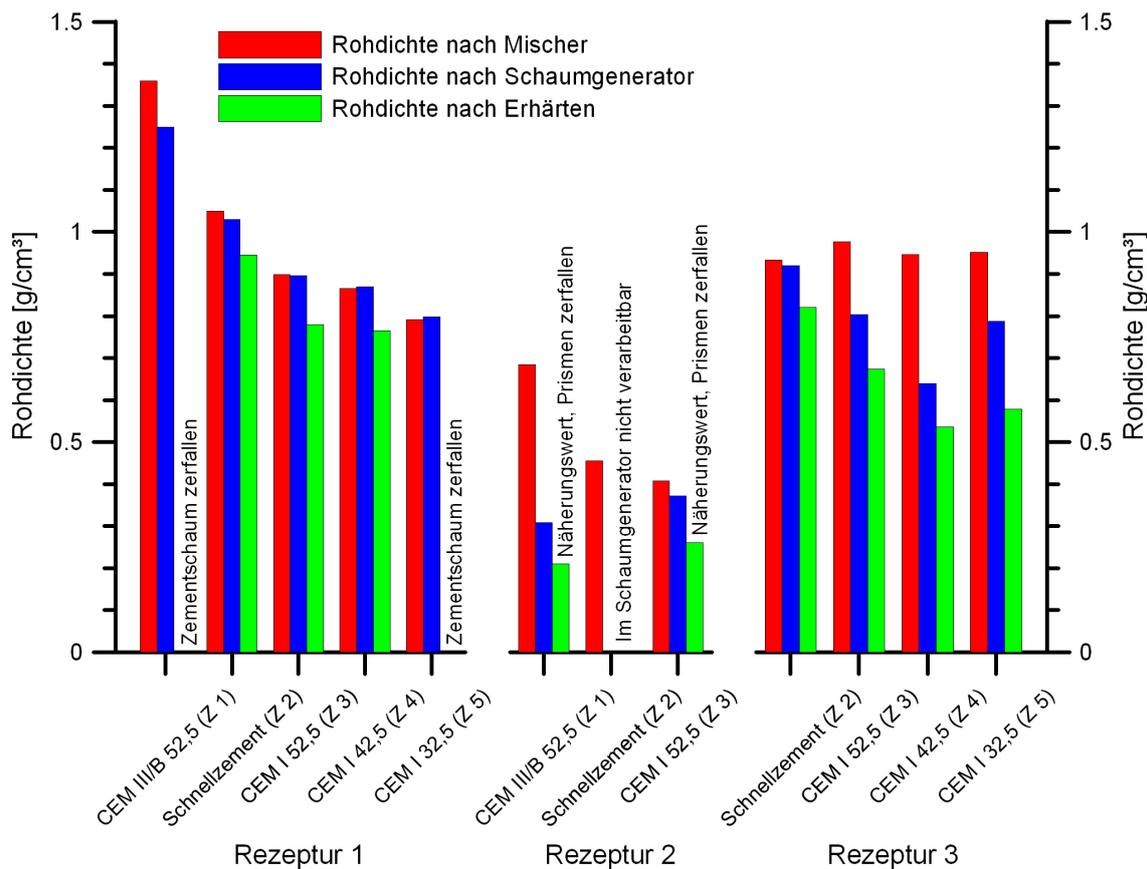


Abbildung 5.8: Einfluss der Zementart auf die Rohdichten zu den drei Bestimmungszeitpunkten

Der Vergleich der Zemente Z 1 bis Z 3 (Festigkeitsklasse 52,5) in den Rezepturen 1 und 2 zeigt, dass sich mit zunehmender Mahlfeinheit tendenziell höhere Rohdichtewerte ergeben. Dieser Zusammenhang zwischen Mahlfeinheit und Luft eintrag wird auch im Vergleich der CEM I-Zemente (Z 2 - Z 5) bestätigt. Die Rohdichten nehmen sowohl für Rezeptur 1 als auch für Rezeptur 3 vom feineren Z 2 zum gröberen Z 5 hin ab. Eine Ausnahme stellt lediglich der Vergleich von Z 4 und Z 5 in Rezeptur 3 dar. Hier ergeben sich nach dem Aufschäumen im Schaumgenerator für Z 5 etwas höhere Rohdichtewerte. Da die Korngrößenverteilungen der beiden Zemente jedoch sehr ähnlich sind, ist davon auszugehen, dass die üblichen Schwankungen im Herstellungsprozess die Einflüsse des Zements überlagert haben.

Es ist festzustellen, dass sich die Einflüsse der Zemente bei den Rezepturen 1 und 2 primär auf das Aufschäumen im Zwangsmischer auswirken, bei Rezeptur 3 vor allem auf das Aufschäumen im Schaumgenerator. Das ist auf eine unterschiedliche Eignung der Rezepturen für die Aufschäumverfahren zurückzuführen. Diese wiederum ist bedingt durch Veränderungen anderer Ausgangsstoffe

(Fließmittel, Schaummittel, org. Stabilisierer), deren Einflüsse in den folgenden Abschnitten noch genauer dargestellt werden.

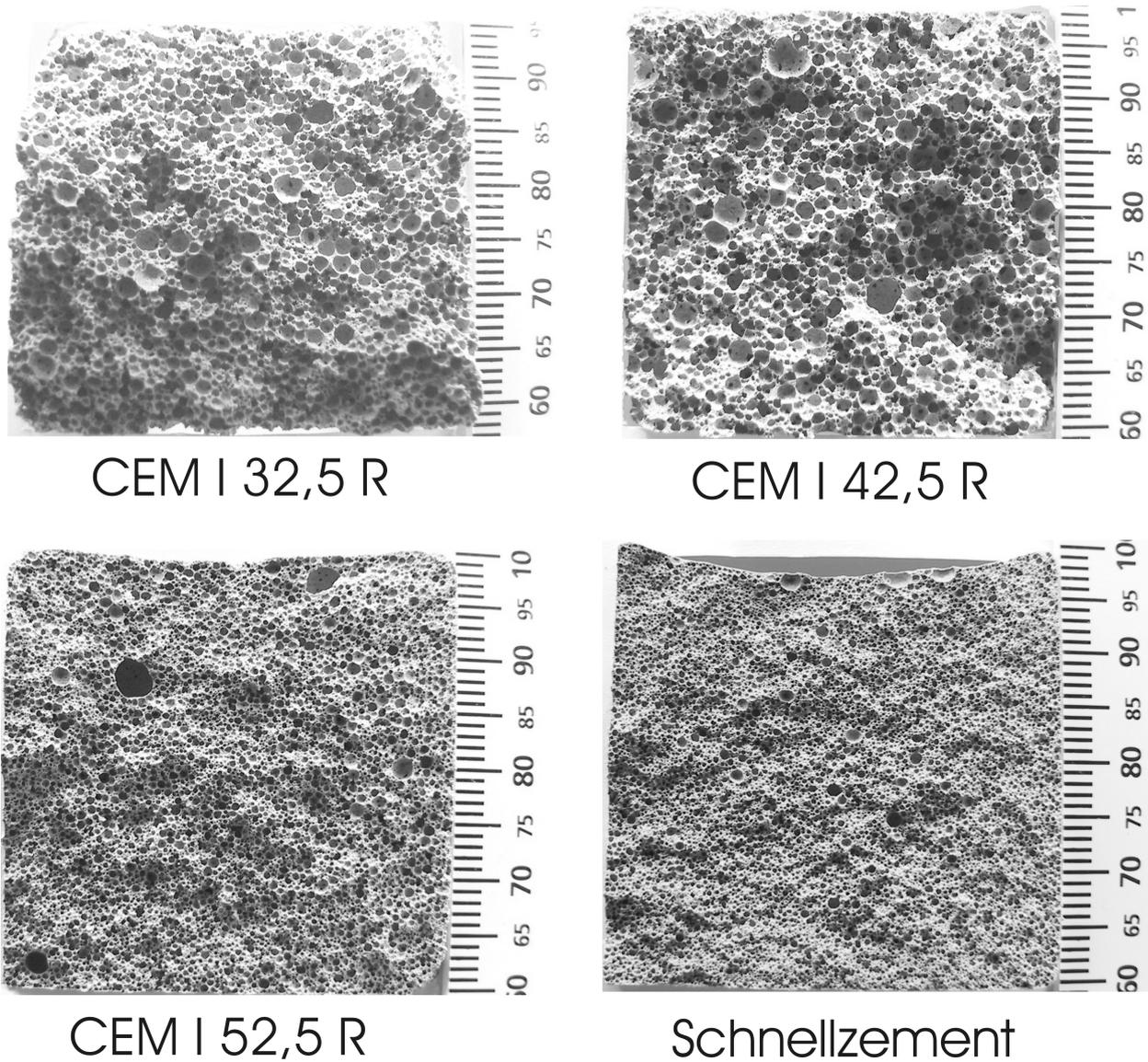


Abbildung 5.9: Einfluss der Zementart auf die Porenstruktur

Hinsichtlich der Schaumstabilität lassen sich aus der vergleichenden Gegenüberstellung der CEM I-Zemente (Z 2 - Z 5) in Abbildung 5.9 Vorteile für die feineren, schnellen Zemente erkennen. Die Porenstruktur wird vom CEM I 32,5 R (Z 5) zum Schnellzement (Z 2) hin jeweils feiner. Das Ausmaß der Veränderung korreliert dabei mit den in Abbildung 5.7 dargestellten Feinheiten der Zemente. Als Ursache dafür kommen drei Effekte in Frage, eine Reduzierung der Drainage durch das ausgeprägtere Wasserbindevermögen auf Grund der größeren Oberfläche, ein schnelleres Ansteifen, das den Schaumzerfall deutlich eher be-

endet, und die etwas höheren Rohdichten, die von Beginn an dickere, stabilere Porenlamellen zulassen. Eine Gewichtung dieser Effekte ist auf Grundlage der geschilderten Versuche nicht möglich.

Die untersuchten Zementschäume aus dem CEM III/B 52,5 (Z 1) wiesen beide eine relativ geringe Schaumstabilität auf. Der Schaum aus Rezeptur 1 ist gänzlich zerfallen, und auch bei Rezeptur 2 war der Schaum so fragil, dass er nicht zerstörungsfrei ausgeschalt werden konnte. Weitere hier nicht im Einzelnen aufgeführte Versuche lieferten ähnliche Ergebnisse und zeigten eine extreme Erstarrungsverzögerung, z.T. von mehreren Tagen. Daher sind Zementleime mit geringen Portlandzementklinkeranteilen in Verbindung mit den hohen Zusatzmitteldosierungen nicht für die Herstellung von aufgeschäumten Zementleimen geeignet. Auch eine extrem hohe Mahlfeinheit führt in diesen Fällen nicht zu einem ausreichend schnellen Erstarren.

Fasst man die Grundtendenzen aller dargestellten Versuche zusammen, führt eine geringere Mahlfeinheit der Zemente zu niedrigeren Rohdichten der aufgeschäumten Zementleime bzw. zu einem höheren Lufteintrag in die Zementleime. Da der Wasseranspruch der Zemente im Allgemeinen an die Mahlfeinheit gekoppelt ist (vgl. Tabelle 5.3), stützen die Ergebnisse die These, dass Leime mit höherem Anteil freien Wassers, das nicht an Feststoffoberflächen gebunden ist, ein besseres Aufschäumverhalten aufweisen. Dieses gilt insbesondere für das Aufschäumen im Zwangsmischer. Je geringer die Unterschiede zwischen den Kornbändern der Zemente sind, desto indifferentere sind auch die Unterschiede bei den Rohdichten. Deutlich wird dieses bei den Zementen Z 4 und Z 5, die sehr ähnliche Korngrößenverteilungen aufweisen. Die Schäume mit groben Zementen weisen tendenziell bis zum Erstarren eine geringere Stabilität auf. Neben den durch den höheren Luftgehalt zwangsläufig dünneren und daher fragileren Lamellen zwischen den Poren, kann diese darauf zurückgeführt werden, dass der größere Anteil freien Wassers die Drainage verstärkt. Das schnellere Ansteifen feiner Zemente beendet darüber hinaus den Schaumzerfall eher.

Einflüsse der Zemente auf die Festigkeit werden an späterer Stelle (Abschnitt 5.4.1) untersucht.

5.3.3 Füller

Als Füller wurden insgesamt neun verschiedene Stoffe untersucht. Dabei handelte es sich um fünf Flugaschen FA 1 bis FA 5, drei Kalksteinmehle KSM 1 bis

KSM 3 und einen Silikastaub. Bei FA 5 und KSM 3 handelte es sich um besonders feine Produkte, die sich deutlich von den anderen untersuchten Flugaschen bzw. Kalksteinmehlen unterscheiden und daher in den nachfolgenden Diagrammen zusammen mit dem ebenfalls sehr feinen Silikastaub jeweils am Ende der Säulenreihen dargestellt sind. Die Diagramme 5.10 und 5.11 zeigen den Einfluss unterschiedlicher Füller auf die Schaumrohrdichten zu den drei Untersuchungszeitpunkten. Im ersten Diagramm wurden die Füller mit dem relativ groben Zement Z 5 (CEM I 32,5 R) kombiniert, im zweiten Diagramm mit dem feineren Zement Z 3 (CEM I 52,5 R) identischer Herkunft. In allen Fällen handelt es sich um Rezepturen mit gleichen Massenverhältnissen der Ausgangsstoffe. Die verschiedenen Rohdichten der Füller schlugen sich daher in unterschiedlichen Volumenverhältnissen und Leimrohrdichten nieder. Ein systematischer Zusammenhang zwischen der Füllerrohrdichte (in den Diagrammen angegeben) und den resultierenden Schaumrohrdichten kann aber nicht beobachtet werden. Daher ist davon auszugehen, dass die Stoffrohrdichte des Füllers nur einen untergeordneten Einfluss für die Schaumrohrdichten hat und von anderen Einflüssen überlagert wird.

In beiden Diagrammen wird deutlich, dass mit allen verwendeten Füllern Rohdichten ähnlicher Größenordnung erreicht werden. Tendenziell schneiden die sehr feinen Füller (FA 5, KSM 3, Silikastaub), wie bereits die feinen Zemente in Abschnitt 5.3.2, etwas schlechter ab. Eine verallgemeinernde, vergleichende Bewertung der Stoffe untereinander ist bei den geringen Unterschieden nicht sinnvoll, da der Austausch des Füllers die Eigenschaften des Leims auf vielfältige Weise beeinflusst, z.B. durch die unterschiedlichen Rohdichten, unterschiedliche Kornbänder und differierende Wasseransprüche, aber auch durch Wechselwirkungen mit Zusatzmitteln. Bereits durch geringe Anpassungen der jeweiligen Rezeptur kann sich die Wirkung der einzelnen Füller untereinander verschieben. Dieses gilt auch für die ungünstigeren Ergebnisse der feinen Füller. Da die Feinheit, insbesondere in Verbindung mit dem gröberen Zement, einen deutlicheren Einfluss aufweist als die Art und Herkunft der Füller, ist davon auszugehen, dass die größere Oberfläche mit dem damit verbundenen höheren Wasseranspruch die primäre Veränderung ausmacht. Mit der Reduzierung des freien, nicht an Oberflächen angelagerten Wassers kommt es zu einem verminderten Lufteintrag (vgl. Abschnitt 4.2.3).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass keiner der untersuchten Füller einen besonders ausgeprägten Einfluss auf das Aufschäumen oder die Schaumstabilität besitzt. Da durch die Auswahl ein großes Spektrum der als Beton-

5.3 Einflüsse der Leimkomponenten auf das Schäumungsverhalten und die Schaumstabilität

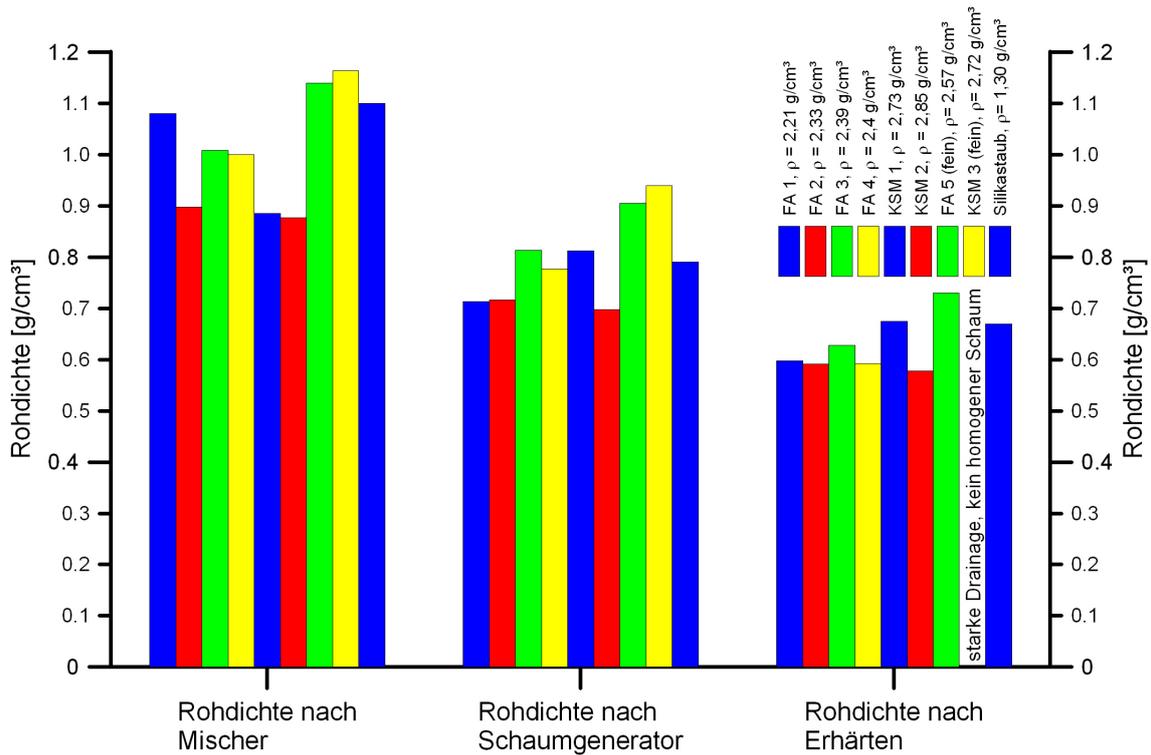


Abbildung 5.10: Einfluss der Füllerart auf die Rohdichten bei grobem Zement

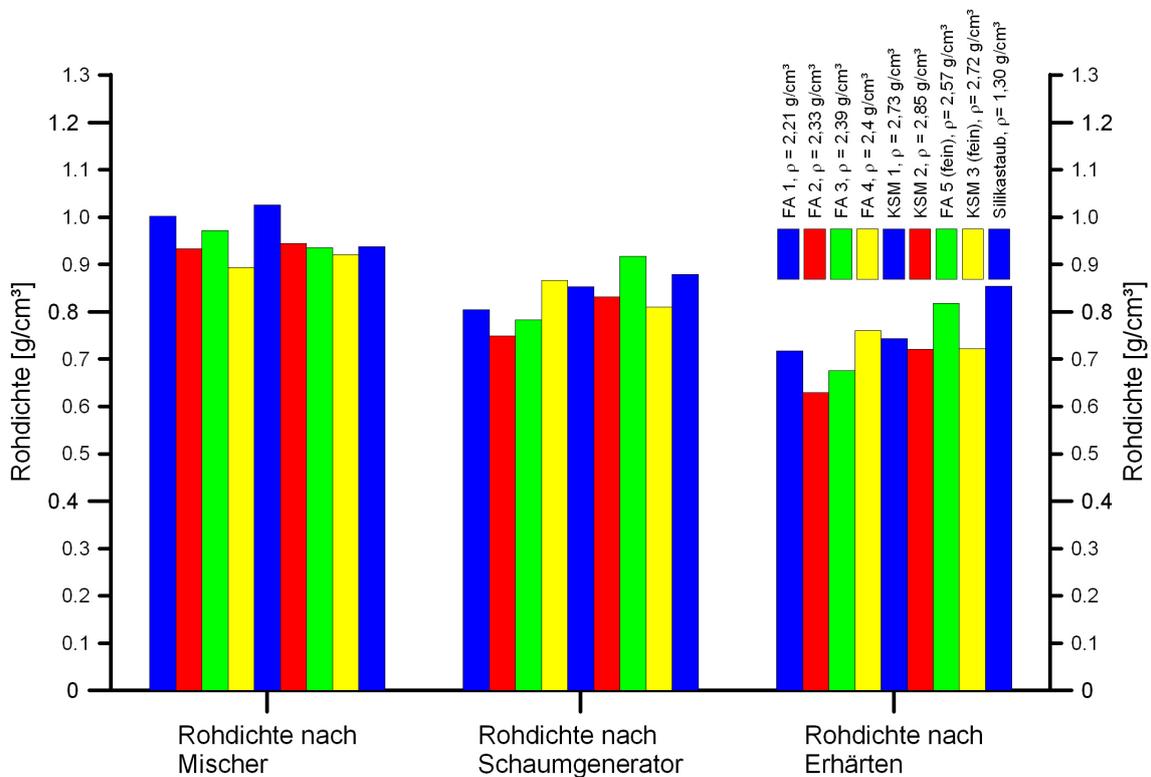


Abbildung 5.11: Einfluss der Füllerart auf die Rohdichten bei feinem Zement

zusatzstoffe verwendeten Füller (Flugaschen, Gesteinsmehle und Silikastäube) abgedeckt wird, ist davon auszugehen, dass diese Aussage auch auf ähnliche Füller wie z.B. Quarzmehle übertragbar ist.

5.3.4 Schaummittel

Zur Analyse der Einflüsse aus Art und Dosierung der Schaummittel wurden mit insgesamt vier Schaummitteln Versuche durchgeführt. Drei dieser Schaummittel wurden auf Tensidbasis hergestellt (SM 1 - SM 3), eins auf Basis von Proteinen (SM 4). Da davon auszugehen war, dass die Wassergehalte einen merklichen Einfluss auf die Wirksamkeit der Schaummittel haben, wurden die drei Schaummittel auf Tensidbasis zunächst für zwei Rezepturen mit verschiedenen Wassergehalten untereinander verglichen (s. Abbildung 5.12).

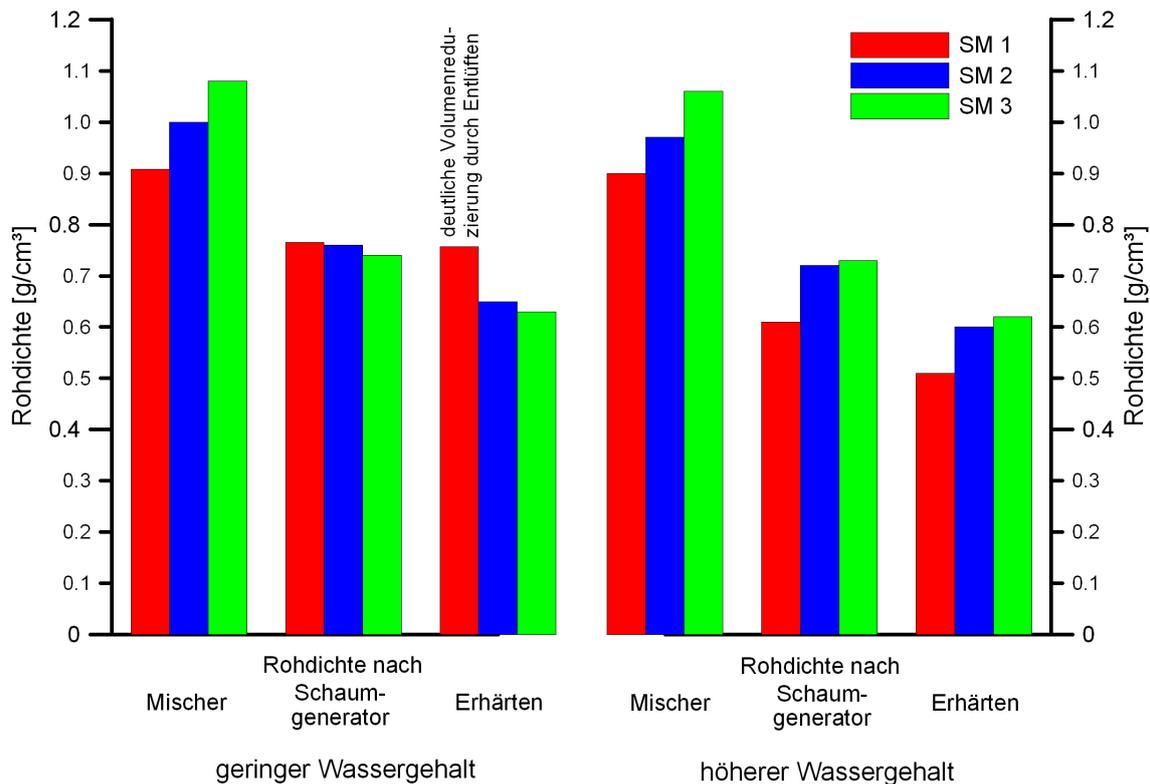


Abbildung 5.12: Vergleich unterschiedlicher Tensidschaumbildner bei verschiedenen Wassergehalten

Die hier dargestellten Ergebnisse der Rohdichtebestimmung zu den unterschiedlichen Bestimmungszeitpunkten weisen jeweils ähnliche Rohdichtewerte auf. Daher sind die verwendeten Tensidschaummittel mit Blick auf die Schaumerzeugung für die gewählten Rezepturen alle als tauglich einzustufen. Da SM 1 hinsichtlich des Lufteintrags meist die günstigsten Werte lieferte, wurde es, soweit

nicht anders vermerkt, für die weiteren Versuche verwendet. Für die anderen Tensidschaumbildner wären aber keine grundsätzlich anderen Ergebnisse zu erwarten (vgl. auch Abbildung 5.17).

In weiteren Versuchsreihen wurde die Dosierung der Schaumbildner untersucht. Hierbei kam neben dem Tensidschaummittel SM 1 auch das Proteinschaummittel SM 4 zur Anwendung. Für das Schaummittel SM 1 wurde zusätzlich die Zementfeinheit variiert (CEM I 52,5 R statt CEM I 42,5 R), um ggf. geometrische Einflüsse der Feststoffe auf die aufschäumende Wirkung der Schaummittel zu erfassen. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in den Abbildungen 5.13 und 5.14 dargestellt.

Aus den Rohdichtewerten nach dem Mischen im Zwangsmischer ergibt sich für alle Schaummittel ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Dosierung des Schaummittels und der resultierenden Rohdichte. Für das Tensidschaummittel gilt, dass die Rohdichte mit zunehmender Schaummitteldosierung abnimmt, was auf einen erhöhten Lufteintrag schließen lässt. Dieser Effekt entspricht den in Abschnitt 4.2.2 erläuterten theoretischen Modellen, wonach durch die höhere Konzentration grenzflächenaktiver Stoffe eine schnellere und effektivere Stabilisierung eingetragener Luftblasen erfolgt. Die Unterschiede, die sich für das feinere und gröbere Feststoffgemisch ergeben, sind primär auf die unterschiedlichen Wasseransprüche der Feststoffe zurückzuführen. Da der feine Zement mit seiner größeren Oberfläche einen höheren Wasseranspruch aufweist, steht eine geringere Menge freien Wassers für die Grenzflächenbildung zur Verfügung. Gleichzeitig reduziert sich auch der mittlere Abstand der Feststoffe untereinander, was die Mobilität der Schaummittelmoleküle verringert. Dadurch ergibt sich nach Abschnitt 4.2.2 eine verzögerte Stabilisierung der eingetragenen Luftblasen, die die geringeren erreichbaren Luftgehalte begründet.

Für das Proteinschaummittel stellt sich ein anderes Ergebnis dar. Hier führt eine höhere Dosierung zu höheren Rohdichten und somit zu einem geringeren Lufteintrag. Gleichzeitig konnte eine zunehmende Zähigkeit und Klebrigkeit der Leime beobachtet werden. Diese Veränderung der Leimeigenschaften ist durch die langkettige Struktur der grenzflächenaktiven Makromoleküle der Proteinschaumbildner mit teils hydrophilen Gruppen zu begründen, die ein wasseranlagerndes Verhalten ähnlich dem der organischen Stabilisierer aufweisen. Durch die Zähigkeit und Klebrigkeit des Leims wird der Lufteintrag, wie in Abschnitt 4.2.3 geschildert, zunehmend unterdrückt, weshalb es zu den insgesamt wesentlich höheren Rohdichten als bei Verwendung der Tensidschaumbildner kommt.

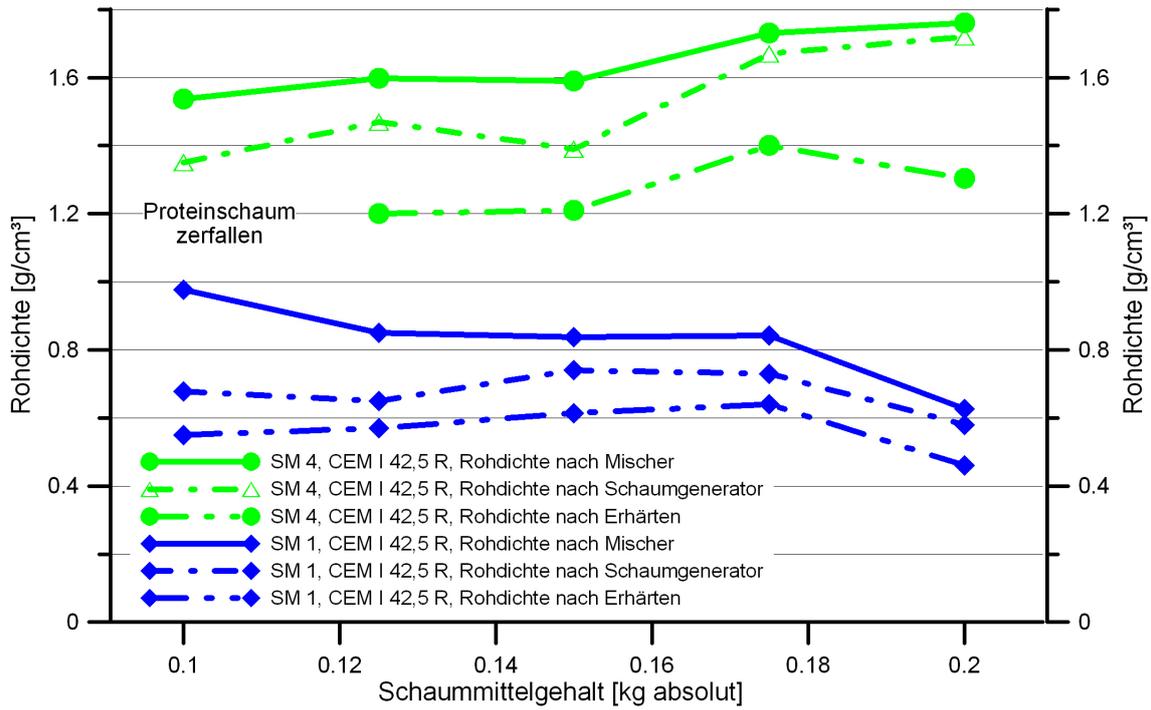


Abbildung 5.13: Einfluss der Schaummitteldosierung auf die Rohdichte bei Tensid- und Proteinschaumbildnern

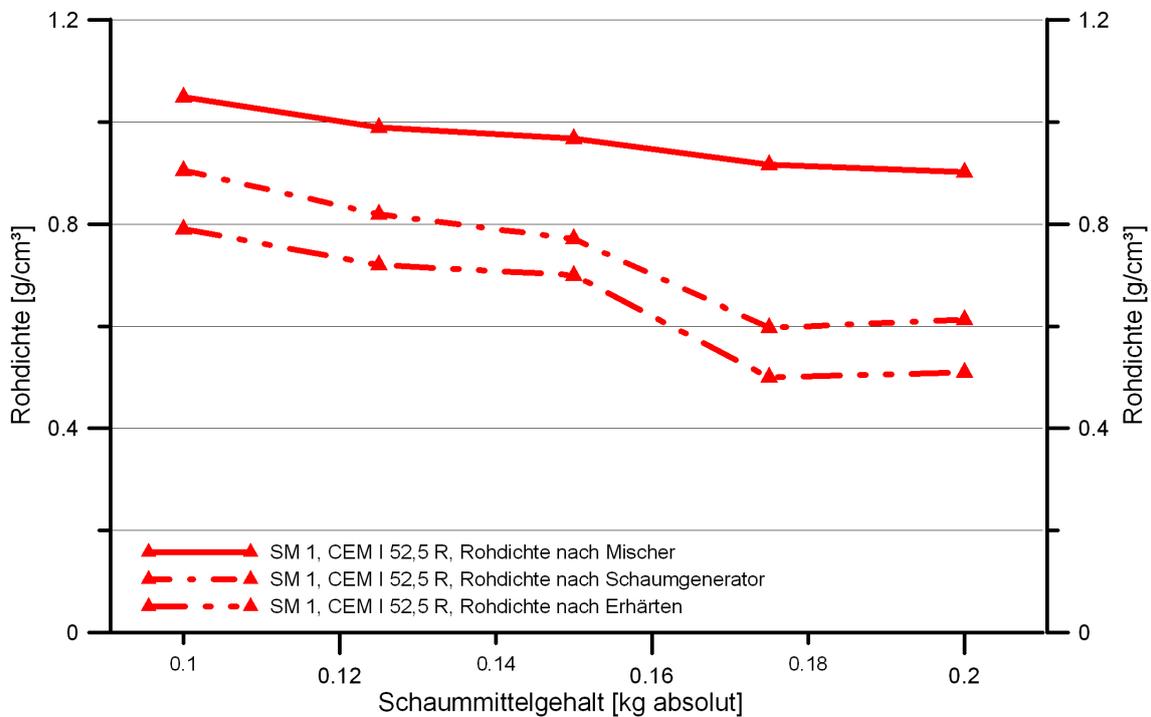


Abbildung 5.14: Einfluss der Schaummitteldosierung auf die Rohdichte bei Tensidschaumbildnern und feinerem Zement

Einzelne hier nicht dargestellte Versuche mit signifikant höheren Wassergehalten und geringeren Dosierungen von Proteinschaumbildnern und/oder organischen Stabilisierern unterstützen diese Annahme, da sie zu günstigeren Rohdichtewerten führten. In der Regel konnten diese Schäume jedoch entweder nicht stabil hergestellt werden oder wiesen eine extrem geringe Festigkeit auf. Von ihrer Rezeptursystematik waren sie mit den hier dargestellten Zementschäumen nicht vergleichbar.

Für die Wirksamkeit des Schaumgenerators ergeben sich unterschiedliche Tendenzen für die verschiedenen Zemente. Bei Verwendung des gröberen CEM I 42,5 R (Abbildung 5.13) nimmt die Differenz der Rohdichten nach dem Mischer und nach dem Schaumgenerator mit zunehmender Schaummitteldosierung ab. Somit reduziert sich der zusätzliche Lufteintrag im Schaumgenerator. Für den Tensidschaumbildner führt dieses dazu, dass die im Mischer erreichten Vorteile höherer Dosierungen egalisiert werden und über den gesamten untersuchten Dosierbereich keine wesentlichen Veränderungen der Rohdichte nach dem Aufschäumen im Schaumgenerator festzustellen sind. Bei dem Proteinschaumbildner, der bereits im Mischer mit steigender Schaummitteldosierung ungünstigere Rohdichtewerte lieferte, wird diese Tendenz noch verstärkt. Für die Proteinschaumbildner kann die Abnahme des Lufteintrags im Schaumgenerator bei zunehmender Schaummitteldosierung durch die deutlich zunehmende Zähigkeit des Leims erklärt werden, die der in den Schaumgenerator einströmenden Luft einen größeren Widerstand entgegengesetzt. Bei den Tensidschaumbildnern ist diese Veränderung des Leims geringer ausgeprägt. Daher sind hier weitere Ursachen in Erwägung zu ziehen. Bei dem feineren CEM I 52,5 R verhält sich die Differenz der Rohdichten nach Mischen und Schaumgenerator entgegengesetzt. Hier scheint sich nicht nur der Lufteintrag im Mischer, sondern auch der im Schaumgenerator mit zunehmender Schaummitteldosierung zu erhöhen. Die von vorne herein höheren Rohdichten der Zementschäume mit dem feinen Zement können auf die tendenziell steifere Konsistenz durch den höheren Wasseranspruch des Zements zurückgeführt werden. Die sehr ähnlichen und relativ geringen minimalen Rohdichten der beiden Mischungen mit Tensidschaumbildner sowie der sich für hohe Schaummitteldosierungen andeutende waagerechte Kurvenverlauf der Rohdichte nach dem Aufschäumen auch für den feinen Zement, legen jedoch die Vermutung nahe, dass es sich hier um eine untere Rohdichtegrenze handelt, die z.B. aus geometrischen Gründen keinen weiteren Lufteintrag mehr zulässt. Rechnerisch ergeben sich bei diesen geringen Rohdichten des frischen Zementschaums Luftgehalte von ca. 65 Vol.-%. Vergleicht

man diesen Wert mit den Modellrechnungen zur maximalen Porosität von Zementleimen, die in Abbildung 4.3 dargestellt wurden und auf einer weitgehend optimierten Porenradienverteilung beruhen, erscheint dieses plausibel.

Die Differenzen der Rohdichten nach dem Schaumgenerator und im erhärteten Zustand sind unabhängig von der Schaummitteldosierung weitgehend konstant. Auffällig ist allerdings, dass die Mischungen mit Proteinschaumbildner eine deutlich größere Differenz zeigen. Eine Ursache dafür ist, dass die zugehörigen Prismen meist stärkere konkave Verformungen an der Oberseite aufwiesen und daher die Volumenbestimmung tendenziell zu hohe Werte lieferte.

Die Schaumstabilität im Hinblick auf Schwindrisse und Verformungen der Prismen wurde mit steigender Schaummitteldosierung besser. Im Vergleich der Schaumbildner hinterließen die Zementschäume mit Tensidschaumbildner einen positiveren Eindruck.

Ergänzend zu den Betrachtungen der Rohdichte, stellvertretend für den Luftgehalt, wurden auch Untersuchungen zum Einfluss der Schaummitteldosierung auf die Porengröße vorgenommen. Dazu diente eine mikroskopische Luftporenuntersuchung nach [24], die in Abschnitt 5.4.2 näher beschrieben wird. Abbildung 5.15 zeigt vergleichend die an fünf Probekörpern mit unterschiedlichen Schaummitteldosierungen und sonst gleicher Rezeptur ermittelten Summenlinien der Luftporengehalte.

Ein systematischer Zusammenhang zwischen der Schaummitteldosierung und der Porengrößenverteilung kann anhand der hier durchgeführten Untersuchungen nicht festgestellt werden. Es treten zwar insbesondere im Bereich der Porendurchmesser zwischen 0,5 mm und 1,5 mm deutliche Unterschiede auf, die aber nicht mit der Schaummitteldosierung korrelieren. Die Kurven deuten jedoch darauf hin, dass die Porengrößenverteilung einen Einfluss auf den Gesamtluftgehalt hat. Hier führt eine feinere Porenstruktur tendenziell zu geringeren Gesamtluftgehalten. Die Ursachen hierfür können einerseits in den geometrischen Randbedingungen liegen, die bei einer Mindestdicke der Lamellen zwischen zwei Blasen bei einer höheren Anzahl (feiner) Blasen einen höheren Leimanteil erfordern (vgl. Abschnitt 4.1.1). Andererseits weisen kleinere Poren auf Grund ihres höheren Innendrucks geringere scherinduzierte Verformungen auf, was nach Abschnitt 2.6 das Viskositätsverhalten der Zementschäume beeinflusst und daher zu einem veränderten Lufteintrag führen kann. Zusätzlich hat, wie schon angesprochen, auch die Schaummitteldosierung selbst einen Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften des Leims, so dass sich auch dadurch ein

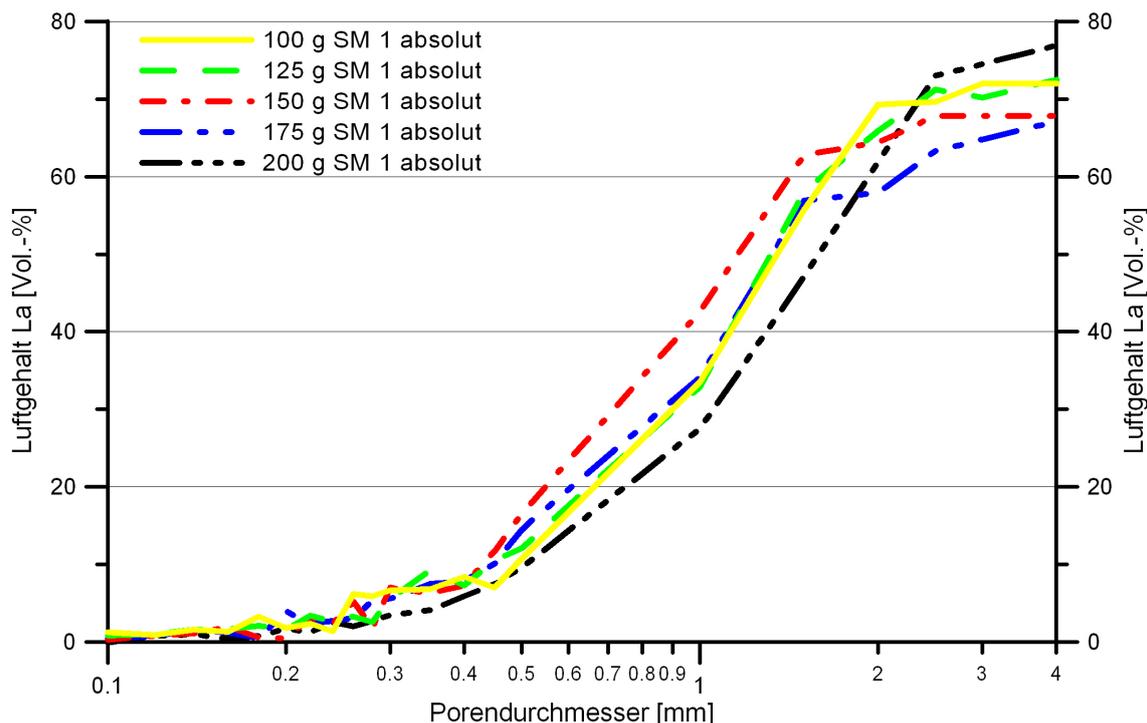


Abbildung 5.15: Einfluss der Schaummitteldosierung auf die Poregrößenverteilung

verändertes Aufschäumverhalten ergeben kann. Eine quantitative Zuordnung des beobachteten Effekts zu den unterschiedlichen Ursachen ist auf Basis der hier durchgeführten Versuche nicht möglich. Der mit diesem Verfahren ermittelte Gesamtluftgehalt ist aus Gründen, auf die in Abschnitt 5.4.2 noch näher eingegangen wird, nur als relativer Wert für vergleichende Betrachtungen der Poregrößenverteilung geeignet, gibt aber nicht den tatsächlichen Luftgehalt des Zementschaums wieder.

5.3.5 Fließmittel

Zur exemplarischen Untersuchung der Fließmitteleinflüsse kamen zwei Fließmittel zum Einsatz, eins auf Basis eines Polycarboxylatethers (FM 1a), das andere auf Naphtalinsulfonatbasis (FM 2). Um den Einfluss der den Fließmitteln zugesetzten Entschäumer zu untersuchen, wurde zusätzlich zu FM 1a das identische Fließmittel ohne Entschäumerzusatz (FM 1b) in vergleichenden Versuchen getestet.

Die folgende Abbildung 5.16 stellt den Einfluss der Fließmitteldosierung auf das Ausbreitfließmaß des Leims sowie die Rohdichten nach dem Mischen und dem weiteren Aufschäumen im Schaumgenerator dar. Im gewählten Dosierbereich ist

der Einfluss der Fließmitteldosierung auf das Ausbreitfließmaß des Leims nach dem Mischen (einschließlich dem dabei erfolgten Lufteintrag) vernachlässigbar und weist keine deutliche Tendenz auf. Dieses gilt sowohl für das FM 1a auf Polycarboxylatetherbasis als auch für FM 2 auf Basis von Naphtalinsulfonaten.

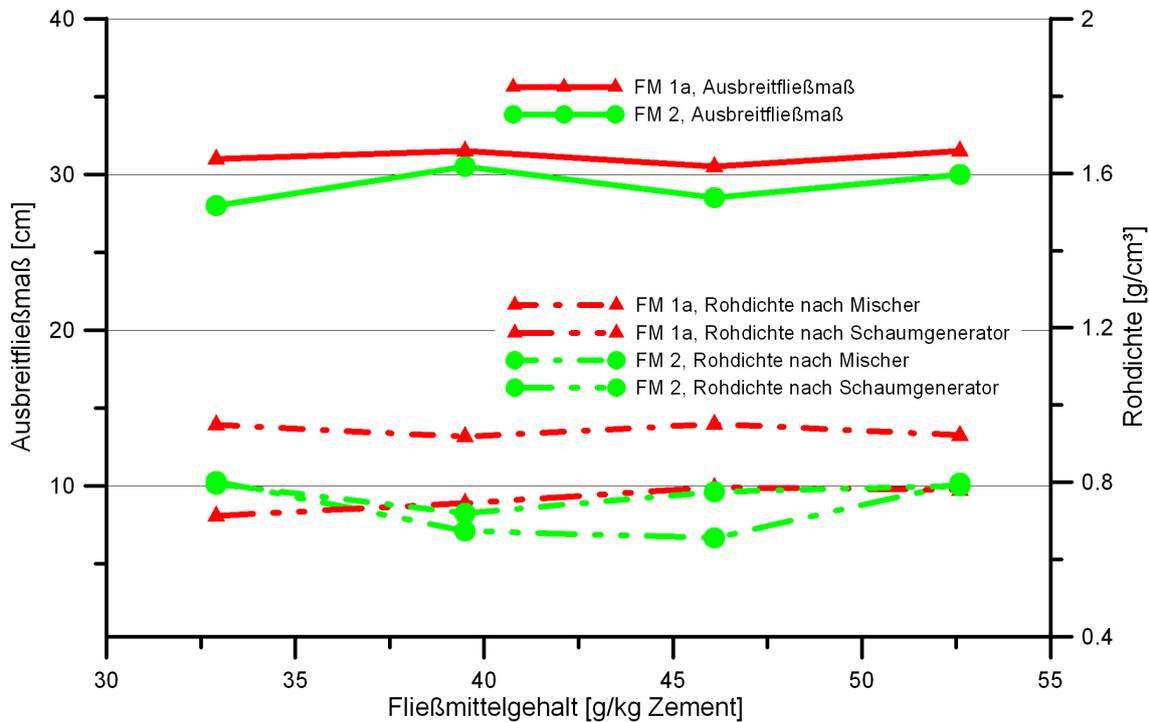


Abbildung 5.16: Einfluss der Fließmitteldosierung auf Ausbreitfließmaß sowie Rohdichte nach Mischen und Aufschäumen, für verschiedene Fließmittel

Im Vergleich der Fließmittel untereinander ergibt sich für den Lufteintrag im Zwangsmischer ein deutlicher Vorteil für das Fließmittel auf Naphtalinsulfonatbasis, dass bei den unterschiedlichen Dosierungen zu einem durchweg höheren Lufteintrag und somit zu geringeren Rohdichten führt. Das zusätzliche Aufschäumen des Leims mit dem Schaumgenerator hat hingegen bei Verwendung des FM 2 eine überwiegend geringe oder keine weitere Erhöhung des Lufteintrags zur Folge. Hier ist das Verhalten mit FM 1a auf Polycarboxylatbasis günstiger. Der deutlich geringere Lufteintrag während der Mischphase im Zwangsmischer wird dabei durch ein zusätzliches Aufschäumen im Schaumgenerator weitgehend ausgeglichen.

Ein systematischer Einfluss der Fließmitteldosierung auf das Aufschäumverhalten kann aus den vorliegenden Ergebnissen nicht abgeleitet werden.

Anders stellt sich die Situation bei den Auswirkungen auf die Schaumstabilität dar. Während die Mischungen mit dem FM 1a auf Polycarboxylatbasis

durchweg eine zufriedenstellende Stabilität aufwiesen, bei der sowohl die Rissbildung an der Oberfläche als auch das Zusammensacken/Entlüften der Proben jeweils nur schwach bis mäßig ausgeprägt war, kam es bei den Proben mit FM 2 auf Naphtalinsulfonatbasis zu einem fast vollständigen Entlüften. Das zeigt, dass die Leime trotz identischer Zusammensetzung (bis auf das Fließmittel) und ähnlichen Ausbreitfließmaßen eine deutlich unterschiedliche Stabilität aufwiesen. Der weitgehende Schaumzerfall deutet darauf hin, dass es zu einem erheblichen Entwässern der Schaumlamellen kam. Als Auslöser dafür kommt eine geringere Bindung des Wassers im Leim in Frage, die auf die unterschiedlichen Wirkprinzipien der Fließmittel (Filmbildung und sterische Hinderung bei Polycarboxylatethern und elektrostatische Abstoßung bei Naphtalinsulfonaten) zurückzuführen ist. Letzteres führt zu einem vermehrten Anteil freien Wassers. Dieser erhöhte Anteil freien Wassers bietet auch einen Erklärungsansatz für die in Abbildung 5.16 dargestellten, unterschiedlichen Verhalten beim Aufschäumen. Wie in Abschnitt 4.2.2 erläutert, fördert ein höherer Gehalt (freien) Wassers die Grenzflächenausbildung und somit die Stabilisierung eingetragener Luftblasen, insbesondere beim Aufschäumen im Zwangsmischer.

Trotz vergleichbarer Ergebnisse beim Aufschäumen der Zementleime sind auf Grundlage der hier durchgeführten Versuche Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatethern wegen einer deutlich besseren Schaumstabilität anderen Fließmitteln (z.B. Naphtalinsulfonaten) vorzuziehen.

Abbildung 5.17 zeigt ebenfalls den Einfluss der Fließmitteldosierung von FM 1a auf das Ausbreitfließmaß des Leims sowie die Rohdichten nach dem Mischen und dem weiteren Aufschäumen im Schaumgenerator, jedoch unter Verwendung unterschiedlicher Tensidschaumbildner (SM 1 und SM 3) sowie eines feineren Zements (Z 3 statt Z 5).

Auch hier zeigt sich kein deutlicher Zusammenhang zwischen der Dosierung des Fließmittels und dem Ausbreitfließmaß. Hinsichtlich der Rohdichten unterscheiden sich die Mischungen mit SM 1 und SM 3 nur geringfügig. Während der Einfluss der Fließmitteldosierung auf das Aufschäumen im Zwangsmischer sehr gering ist, ergibt sich beim Aufschäumen im Schaumgenerator ein in der Tendenz ähnlicher, jedoch ausgeprägter Einfluss. Als Ursache dafür ist die höhere Sensibilität des Schaumgenerators hinsichtlich rheologischer Veränderungen des vorgeschäumten Leims anzunehmen. Auffällig ist, dass die höchsten Rohdichten bei mittleren Fließmittelgehalten auftreten, bei denen auch das jeweilige Ausbreitfließmaß Maxima zeigt. Die Maxima im Ausbreitfließmaß sind allerdings

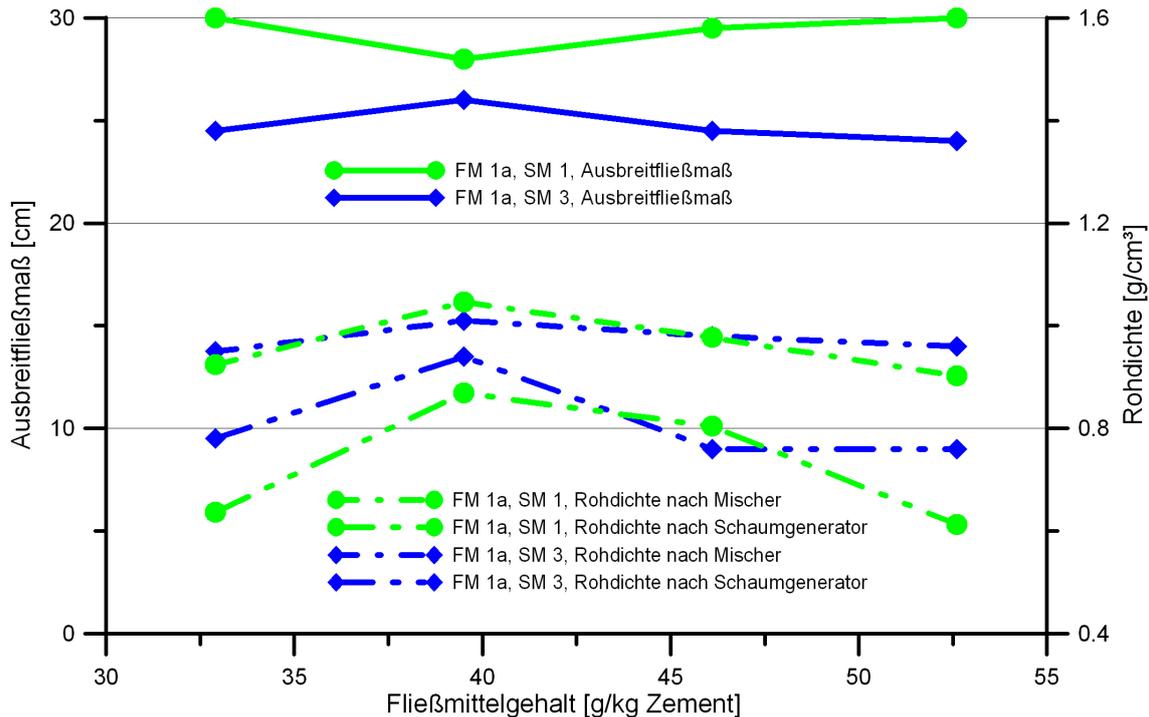


Abbildung 5.17: Einfluss der Fließmitteldosierung auf Ausbreitfließmaß sowie Rohdichte nach Mischen und Aufschäumen, bei unterschiedlichen Schaummitteln

nur schwach ausgeprägt und für SM 1 und SM 3 gegenläufig. Da sich Konsistenz und Luftgehalt des Zementschaums wechselseitig beeinflussen, kann nicht zugeordnet werden, welcher Parameter die Ursache und welcher die Wirkung darstellt. Auch eine Erklärung für das Verhalten fehlt bislang.

Ergänzend zu den vergleichenden Versuchen mit unterschiedlichen Fließmitteln und Fließmittel-Schaummittel-Kombinationen wurden Versuche durchgeführt, um den Einfluss von Entschäumern als Bestandteil der Fließmittel zu untersuchen. Dazu wurden identische Mischungen einmal mit dem normalen FM 1a und einmal mit einer Variante des gleichen Fließmittels ohne Entschäumerzusatz (FM 1b) hergestellt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.18 dargestellt.

Für den Mischprozess im Zwangsmischer ergibt sich durch die Entschäumerwirkung erwartungsgemäß ein Anstieg der Rohdichte, der auf einen geringeren Lufteintrag bzw. eine schlechtere Stabilität der Blasen hindeutet. Auffällig ist, dass sich bei dem anschließenden Aufschäumen im Schaumgenerator ein umgekehrtes Ergebnis einstellt. In allen drei untersuchten Rezepturen wiesen jeweils die Mischungen mit dem Fließmittel mit Entschäumer die geringeren Rohdichten auf. Für dieses Verhalten kann es verfahrenstechnische Gründe geben, z.B. ausgelöst durch die veränderten rheologischen Eigenschaften von Schäumen, die bereits im Zwangsmischer einen hohen Luftgehalt erzielen und wegen derer der

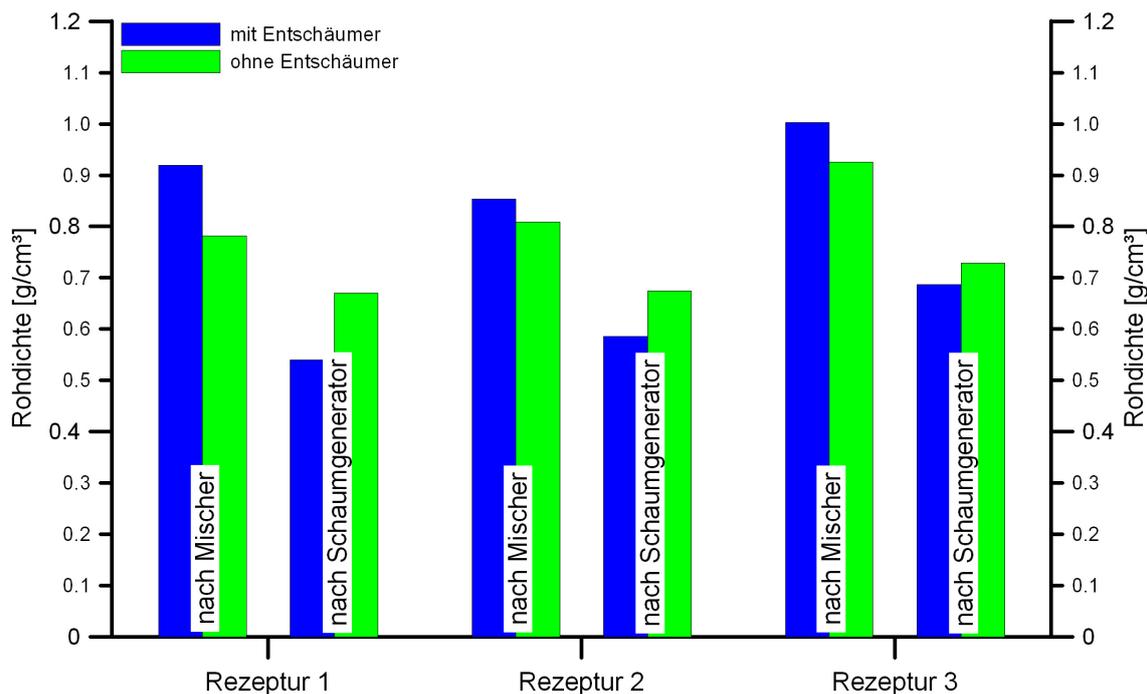


Abbildung 5.18: Einfluss des Fließmittelentschäumers auf die Rohdichte

zusätzliche Lufteintrag sehr gering ausfällt. Es ist auch möglich, dass sich die spezifische Wirkungsweise des verwendeten Entschäumers nur unter den Bedingungen in einem dynamischen Mischer optimal entfaltet, während der Entschäumer bei dem Aufschäumverfahren im Schaumgenerator keinen oder ein eher positiven Einfluss auf den Lufteintrag oder die Blasenstabilisierung hat. Eine abschließende Klärung der Ursachen für dieses unterschiedliche Aufschäumverhalten mit und ohne Entschäumer bedarf weiterer Forschungsaktivitäten zu den verschiedenen hier wirkenden Einflüssen.

Wie bereits für Schaummittel wurde auch hier mit dem in 5.4.2 näher erläuterten Verfahren der Einfluss der Fließmitteldosierung auf die Porengrößenverteilung untersucht.

Die dabei ermittelten und in Abbildung 5.19 dargestellten Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine Beeinflussung der Porengrößenverteilung durch die Fließmitteldosierung vorliegt. Die untersuchten Prismen wiesen mit zunehmender Fließmitteldosierung einen höheren Anteil Poren unter 1,5 mm auf. Die Ursache dafür kann sowohl in einer veränderten Porenstruktur bei der Schaumherstellung (im Mischer und Schaumgenerator) als auch in einer Beeinflussung der Veränderung der Porenstruktur während des Ansteifens und Erhärtens liegen. Im Bereich der Schaumherstellung weisen feinere Porenstrukturen auf eine bessere Dispergierung der eingebrachten Luftblasen und somit auf eine geringfügig

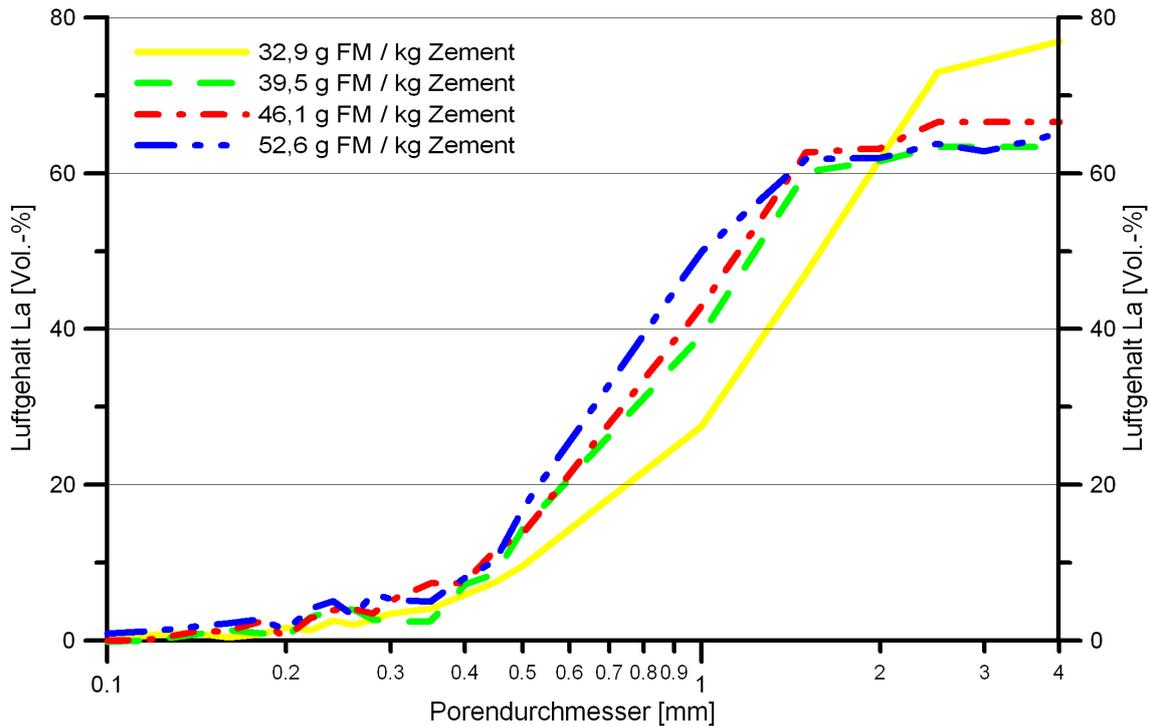


Abbildung 5.19: Einfluss der Fließmitteldosierung auf die Porengrößenverteilung

höhere Viskosität hin. Die verflüssigende Wirkung der Fließmittel wird zwar wesentlich durch ein Herabsetzen der Fließgrenze erreicht, insbesondere bei höheren Dosierungen besteht aber auch eine Neigung der Leime hin zu einem viskoserem, zähflüssigerem Verhalten. Daher ist ein Effekt der Fließmitteldosierung auf die Porenstruktur in der beschriebenen Ausprägung bei der Schaumherstellung möglich. Eine positive Beeinflussung der Schaumstabilität in der Phase des Ansteifens und Erhärtens durch höhere Fließmitteldosierungen ist ebenfalls nachvollziehbar. Obwohl sich die Herabsetzung der Fließgrenze deutlich negativ auf die Drainage auswirkt, bewirken die Fließmittel eine stabile Wasserfilmbildung um die Feststoffpartikel und sorgen so für eine Verringerung des freien Wassers, was, neben der ggf. etwas höheren Viskosität, der Drainage entgegenwirkt. Der beschriebene Effekt, insbesondere aber auch die dargestellten möglichen Ursachen, sind auf Grundlage der hier durchgeführten Versuche nicht eindeutig verifizierbar. Auch hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Gleiches gilt für den bereits bei den Schaummitteln festgestellten und erörterten Zusammenhang zwischen der Porengrößenverteilung und dem Gesamtluftgehalt, der in diesen Versuchen tendenziell bestätigt wird.

5.3.6 Stabilisierer

Auf Grund der in Abschnitt 4.2.3 erläuterten unterschiedlichen Wirkungsweisen von organischen und anorganischen Stabilisierern während des Aufschäumens und bis zum Erstarren und Erhärten, wurden bei den verwendeten Leimrezepturen (vgl. Basisrezeptur in Tabelle 5.2) jeweils sowohl ein anorganischer als auch ein organischer Stabilisierer eingesetzt. Beide sind für die Herstellung von Zementschäumen als eigenständige Zusatzmittelgruppen einzustufen, die nicht gegeneinander austauschbar sind.

Anorganische Stabilisierer

Als anorganischer Stabilisierer kam in allen Versuchen eine Nanosilikasuspension zum Einsatz. Nanosilikasuspensionen beinhalten neben den Silikastauben in der Regel auch Wasser und Dispergierhilfen mit eigenständigen Einflüssen auf den Zementschaum. Bei unterschiedlichen Produkten lassen sich die zu beobachtenden Effekte daher nicht eindeutig auf eine veränderte Charakteristik des Wirkstoffes Silikastaub zurückführen, sondern sind spezifisch für die jeweiligen Rezepturen der Produkte. Hier wird nur der Dosiereinfluss einer ausgewählten Nanosilikasuspension exemplarisch untersucht. In Abbildung 5.20 sind die Ergebnisse der Untersuchungen grafisch dargestellt.

Hinsichtlich des Ausbreitfließmaßes aber auch bezüglich der Rohdichte weisen die Versuche deutliche Schwankungen auf. Erwartungsgemäß zeichnet sich tendenziell eine Reduzierung des Ausbreitfließmaßes mit steigender Dosierung des anorganischen Stabilisierers ab. Eine direkte Korrelation zwischen dem Ausbreitfließmaß und den ermittelten Rohdichten kann nicht festgestellt werden, wenngleich auch die Rohdichten nach dem Mischen im Zwangsmischer mit zunehmender Dosierung des Stabilisierers von der Tendenz her abgenommen haben. Die Rohdichten nach dem Aufschäumen im Schaumgenerator sind durchweg geringer als die nach dem Mischen im Zwangsmischer. Es findet also ein zusätzlicher Lufteintrag statt. Die Differenz der Rohdichten nimmt jedoch stetig und gleichmäßig ab, was auf eine fast lineare Abnahme des Lufteintrags im Schaumgenerator mit steigendem Gehalt des anorganischen Stabilisierers schließen lässt. Dieses Verhalten ist auf eine Erhöhung der Viskosität durch den Stabilisierer zurückzuführen, wodurch der einfließenden Luft im Schaumgenerator eine stärkere Kraft entgegenwirkt (vgl. Erläuterung in Abschnitt 5.2.2). Ein Indiz für die Erhöhung der Viskosität ist ebenfalls das tendenziell abnehmende Ausbreit-

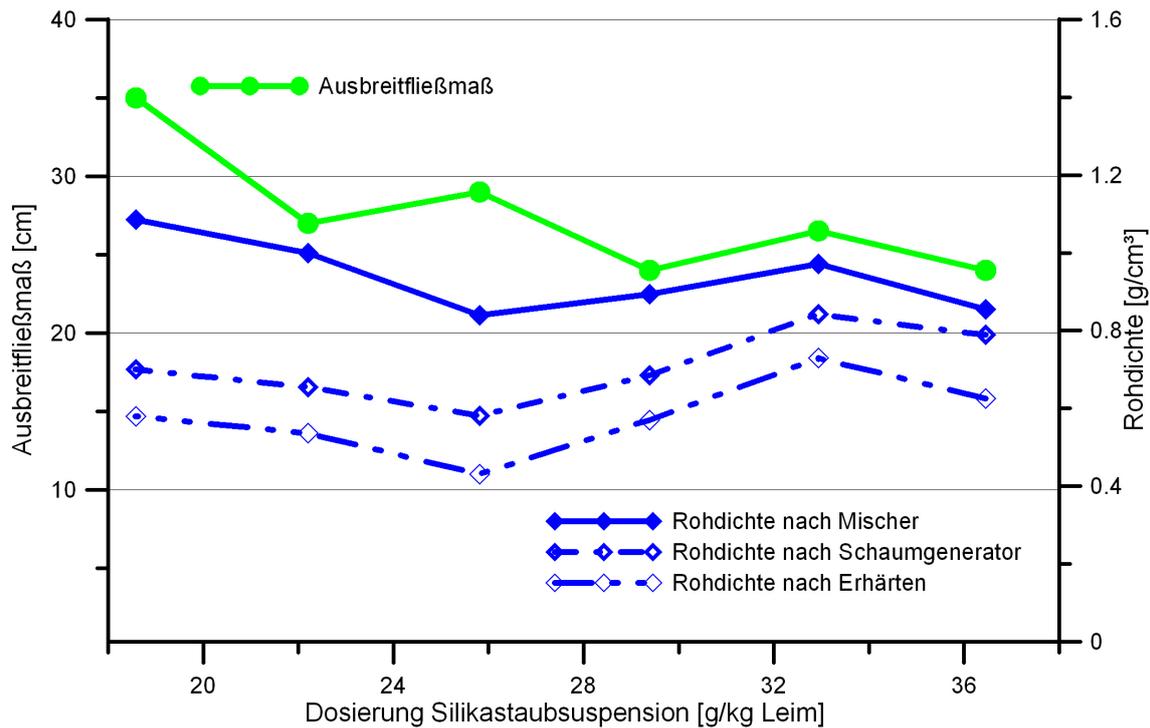


Abbildung 5.20: Beziehung zwischen Dosierung eines anorganischen Stabilisierers und dem Ausbreitfließmaß sowie den Rohdichten zu den drei Bestimmungszeitpunkten

fließmaß, auch wenn es sehr unterschiedliche rheologische Einflussfaktoren in der Messung vereint und daher keine unmittelbaren Rückschlüsse auf die Viskosität zulässt. Die Differenz zwischen der Rohdichte nach dem Aufschäumen im Schaumgenerator und der Rohdichte nach Erhärten ist weitgehend konstant. Folglich hat die als anorganischer Stabilisierer verwendete Silikastaubsuspension keinen grundsätzlich nachteiligen Effekt auf die Schaumstabilität. Auch die Bewertung der Probekörper hinsichtlich Rissbildung und Entlüften ergibt keine deutlichen Unterschiede, was diese Aussage weiter stützt.

Die erwarteten ungünstigen Auswirkungen auf das Aufschäumen bei höherer Dosierung haben sich bestätigt. Besonders deutlich wurde dies beim Aufschäumen im Schaumgenerator. Diese Einflüsse sind primär der Veränderung des Fließverhaltens der vorgeschäumten Leime zuzuschreiben, da der Schaumgenerator besonders sensibel auf Veränderungen der rheologischen Eigenschaften reagiert, wohingegen die Mobilität der Schaummittelmoleküle wegen der relativ langsamen und schonenden Dispergierung eine geringere Rolle spielt. Eventuelle Beeinflussungen der Mobilität der Schaummittelmoleküle können anhand der Ergebnisse nicht belegt werden, da sonst beim Aufschäumen im Zwangsmischer deutlichere Verschlechterungen mit zunehmender Dosierung zu erwarten gewesen wären. Eine schaumzerstörende Wirkung z.B. durch Grenzflächeneffekte

konnte ebenfalls nicht beobachtet werden.

Organische Stabilisierer

Als organische Stabilisierer kamen vier verschiedene pulverförmige Stabilisierer auf Basis von Methylcellulose (Cellulosederivate) zum Einsatz (OS 1 bis OS 4). Nach Herstellerangaben liegen wesentliche Unterschiede der Produkte in dem Grad der Polymerisation, der die mittlere Viskosität beeinflusst, der Größe der Modifikation und der Feinheit des Pulvers. Tabelle 5.4 gibt eine Übersicht über die Eigenschaften der verschiedenen organischen Stabilisierer.

Tabelle 5.4: Vergleich der Eigenschaften der organischen Stabilisierer

	OS 1	OS 2	OS 3	OS 4
Celluloseether Typ	Methylhydroxypropylcellulose	Methylhydroxyethylcellulose	Methylhydroxyethylcellulose	Methylhydroxyethylcellulose
mittlere Viskosität	20000*)	40000*)	45000*)	45000*)
Modifikation	11	01	20	40
Partikelgröße	sehr fein	sehr fein	fein	fein

*) Vergleichswerte [$mPa \cdot s$], abhängig vom Messverfahren

Zur Untersuchung der Wirkungsweisen der unterschiedlichen organischen Stabilisierer wurden zunächst identische Mischungszusammensetzungen mit allen vier Stabilisierern in jeweils unterschiedlichen Dosierungen hergestellt. Um eine Verarbeitbarkeit der Mischungen über das ganze Spektrum der Dosierungen sicherzustellen, wurde die Menge des Zugabewassers gegenüber der Eckrezeptur um ca 15 % erhöht. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in den Abbildungen 5.21 und 5.22 dargestellt.

Anhand des Ausbreitfließmaßes ist deutlich der Einfluss der Stabilisierer auf das Fließverhalten der Zementschäume zu erkennen. Für alle verwendeten Stabilisierer nahm das Ausbreitfließmaß mit steigender Dosierung deutlich ab. Dabei sind keine wesentlichen Unterschiede zwischen den verschiedenen Stabilisierern zu erkennen.

Ein ähnliches Bild ergibt sich für die erreichten Rohdichten nach dem Mischen im Zwangsmischer. Auch hier sind keine markanten Differenzen zwischen den verschiedenen organischen Stabilisierern zu erkennen. Trotz der erheblichen Veränderungen des Ausbreitfließmaßes hatte die Dosierung der organischen Stabilisierer nur einen geringen Einfluss auf die erreichten Rohdichtewerte nach

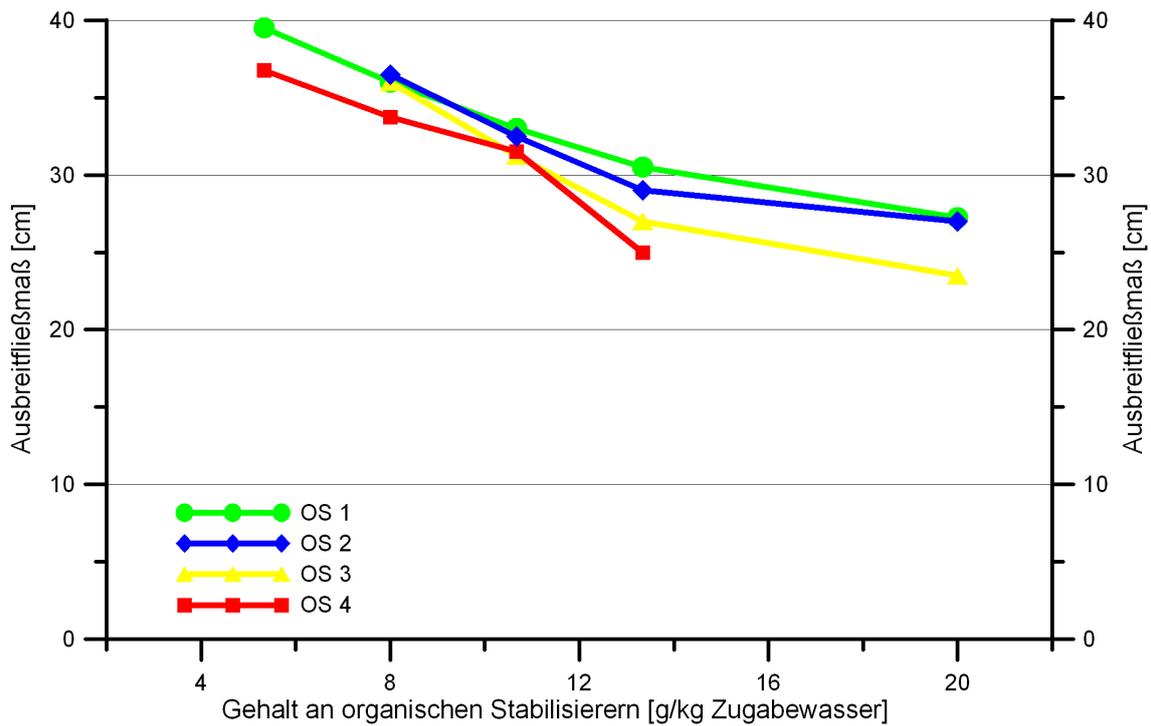


Abbildung 5.21: Korrelation zwischen Dosierung organischer Stabilisierer und Ausbreitfließmaß

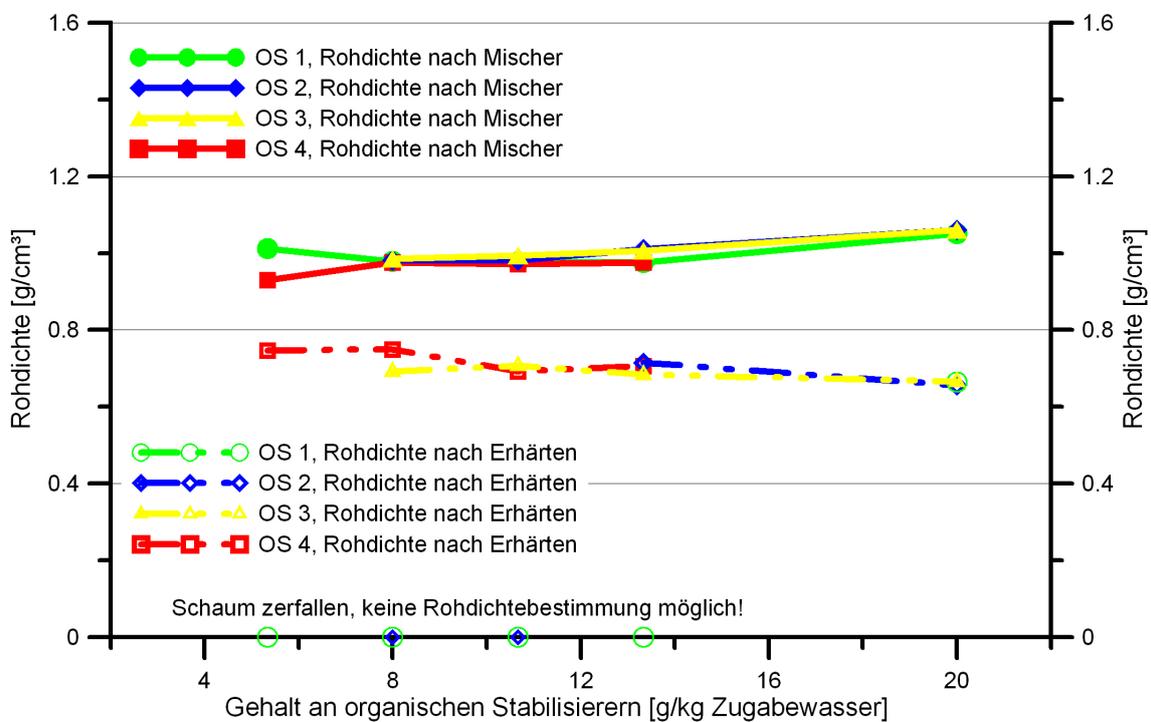


Abbildung 5.22: Korrelation zwischen Dosierung organischer Stabilisierer und Rohdichte

dem Mischen im Zwangsmischer, wobei mit steigender Stabilisiererdosierung die Rohdichte tendenziell zunahm. Deutliche Unterschiede ergeben sich jedoch bei Betrachtung der zusätzlich im Schaumgenerator aufgeschäumten und erhärteten Zementschäume. Hier sind die Zementschäume mit OS 1 und OS 2, also den Stabilisierern mit niedrigerem Polymerisationsgrad und geringerer Modifikation, bei niedriger Stabilisiererdosierung zerfallen. Für alle stabilen Schäume war auch hier kein erkennbarer Unterschied hinsichtlich der erreichbaren Rohdichte nach dem Erhärten festzustellen. Das gilt auch für die Schäume mit OS 1 und OS 2 in höherer Dosierung. Somit wird deutlich, dass die organischen Stabilisierer einen wesentlichen Beitrag zur Stabilisierung der Zementschäume leisten. Voraussetzung dafür ist jedoch eine ausreichend hohe Dosierung, die durch die Eigenschaften der Stabilisierermoleküle, insbesondere deren Größe (Polymerisationsgrad), beeinflusst wird. Größere Moleküle verhalten sich hinsichtlich der Schaumstabilität auch bei geringen Dosierungen günstiger. Offensichtlich besteht zwischen der Schaumstabilität und der Dosierung der organischen Stabilisierer kein stetiger Zusammenhang. Stattdessen gibt es Grenzen für die Dosierung, unterhalb derer der Schaum nicht stabil und oberhalb derer er stabil ist. Bei ausreichender Moleküldichte im Leim kommt es also spontan zu einer stabilisierenden Wirkung, die auf eine einsetzende Interaktion der Moleküle hindeutet (Vernetzung).

Auf Basis dieser Ergebnisse wurde OS 3 für alle anderen Versuche verwendet. Da die Zementschäume entsprechend der Eckrezeptur üblicherweise mit geringeren Wassergehalten hergestellt wurden, wurde für OS 3 unter diesen Randbedingungen erneut der Dosiereinfluss untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abbildung 5.23 dargestellt.

Auch hier zeigt sich ein ähnliches Verhalten. Das Ausbreitfließmaß wird mit zunehmender Dosierung tendenziell geringer, die Rohdichtewerte nach dem Mischen im Zwangsmischer sind für alle geringen Dosierungen nahezu unverändert. Lediglich bei hoher Dosierung nimmt der Lufteintrag offensichtlich ab, was auf eine höhere Zähigkeit zurückzuführen ist (vgl. Abschnitt 4.2.3). Bei geringer Dosierung des OS 3 zeigt sich auch hier, dass die Stabilität des Zementschaums sehr schnell abnimmt. Die Dichte des frischen Zementschaums nach dem Aufschäumen im Schaumgenerator und dem Einbringen in die Schalung ist bei der geringsten Dosierung höher als nach dem Mischen im Zwangsmischer. Das deutet darauf hin, dass es bereits während des Fließvorgangs bis zum Befüllen der Schalung zu einem deutlichen Entlüften kommt. Dieser Zerfall des Zementschaums setzte sich in der Schalung fort, so dass mit dieser Mischung keine

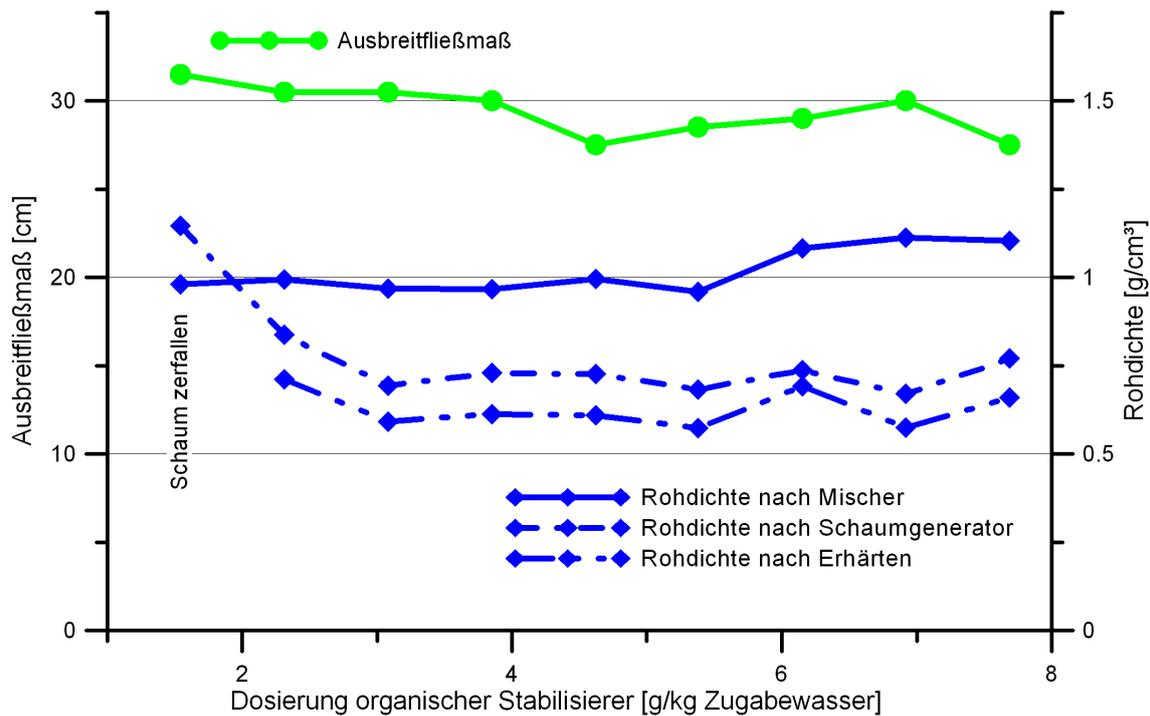


Abbildung 5.23: Einfluss organischer Stabilisierer auf Ausbreitfließmaß und Rohdichten

stabilen Zementschaumprismen hergestellt werden konnten.

Das beschriebene Verhalten der organischen Stabilisierer entspricht weitgehend den zuvor formulierten theoretischen Modellen. Mit zunehmender Dosierung erfolgt eine Veränderung der rheologischen Eigenschaften der Leime, welches durch ein geringeres Ausbreitfließmaß dokumentiert ist. Der Einfluss auf das Aufschäumen ist vergleichsweise gering, solange die Leimeigenschaften nicht zu stark verändert werden. Eine stabilisierende Wirkung auf den Zementschaum ergibt sich erst ab einer von der Molekülgröße abhängigen Mindestkonzentration der Moleküle, die offensichtlich Voraussetzung für ihre Vernetzung ist, wenn der Leim in Ruhe ist.

5.4 Weitere Untersuchungen und Beobachtungen

5.4.1 Festigkeit

Als weitere für die technische Anwendung relevante Kenngröße der Zementschäume wurde ihre Festigkeit im Alter von 28 Tagen ermittelt. Die Prüfungen erfolgten in Anlehnung an DIN EN 196-1 [28] an den hergestellten Zementschaumprismen mit den Abmessungen $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$. Die Prismen wurden

nach Erreichen einer genügenden Festigkeit (i.d.R. nach zwei bis drei Tagen) ausgeschalt und bis zur Prüfung bei 20°C und 65 % rel. Feuchte gelagert. Für die Untersuchungen der Festigkeit konnten nur solche Prismen herangezogen werden, die während des Ansteifens und Erhärtens eine ausreichende Schaumstabilität aufwiesen und daher zum Prüfzeitpunkt die sich aus dem Prüfverfahren ergebenden geometrischen Anforderungen erfüllten. Zementschäume mit sehr starken Entlüftungs-, Entmischungs- oder Zerfallerscheinungen wurden daher nicht in die Untersuchungen einbezogen. Die Prismen wurden zunächst einer Drei-Punkt-Biegezugprüfung unterzogen, bevor die dabei entstehenden zwei Teilstücke jeweils auf ihre Druckfestigkeit hin geprüft wurden. In einzelnen Fällen ließen Zementschaumprismen mit sehr geringen Dichten keine normgemäßen Festigkeitsprüfung zu, da sie nicht die für das Prüfverfahren vorgegebene Vorlast aufnehmen konnten und bereits vor Beginn der eigentlichen Prüfung versagten. Insgesamt wurden ca. 145 Prismen aus knapp 80 verschiedenen Mischungen geprüft. Die Ergebnisse sind in der folgenden Abbildung 5.24 dargestellt.

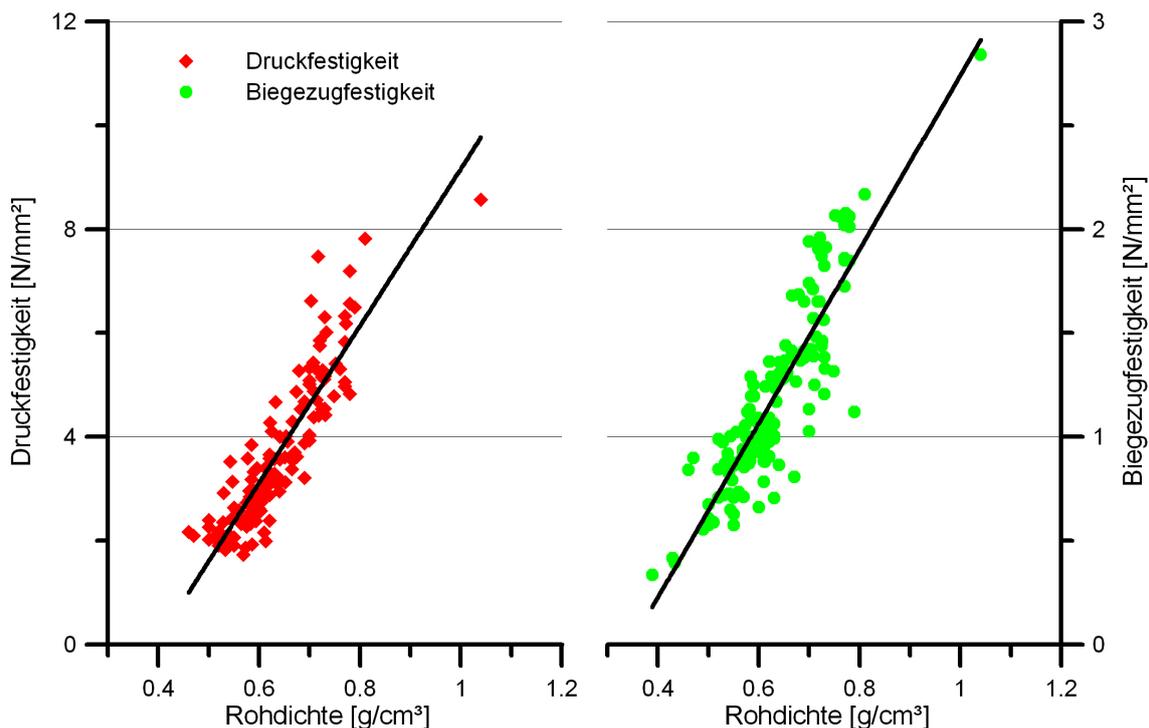


Abbildung 5.24: Korrelation zwischen der Prismenrohichte und der Druck- (links) bzw. Biegezugfestigkeit (rechts), jeweils im Alter von 28 d

Aus den vorliegenden Werten kann unabhängig von den einzelnen Rezepturen auf eine weitgehend lineare Abhängigkeit der Festigkeiten von der Zementschaumrohichte geschlossen werden. Die dargestellten Geraden sind jeweils das Ergebnis einer linearen Regressionsrechnung und weisen ein Bestimmtheitsmaß

$R^2 = 0,80$ für die Druckfestigkeiten bzw. $R^2 = 0,69$ für die Biegezugfestigkeiten auf. Der geringere Wert für die Biegezugfestigkeiten ergibt sich aus der Anwendung des Dreipunkt-Biegezug-Versuchs, der durch eine dreieckige Momentenverteilung besonders anfällig ist für Materialinhomogenitäten im Bereich des Momentenmaximums.

Dass die Bestimmtheitsmaße für beide Regressionsgeraden trotz der großen Anzahl durchgeführter Prüfungen noch relativ gering ist, ist einerseits auf Rezeptureinflüsse (unterschiedliche Zementarten, w/z-Werte, Zusatzmittel und Zusatzstoffe, etc.) zurückzuführen, die sowohl die Festigkeit des Zementsteins als auch die Porenstruktur beeinflussen. Andererseits sind auch bei vergleichenden Prüfungen von Probekörpern aus der selben Mischung z.T. erhebliche Schwankungen der Festigkeitswerte beobachtet worden (vgl. Abbildung 5.25). Als Ursache dafür kommen primär Inhomogenitäten in der Porenstruktur und Vorschädigungen z.B. durch Schwindrisse in Frage.

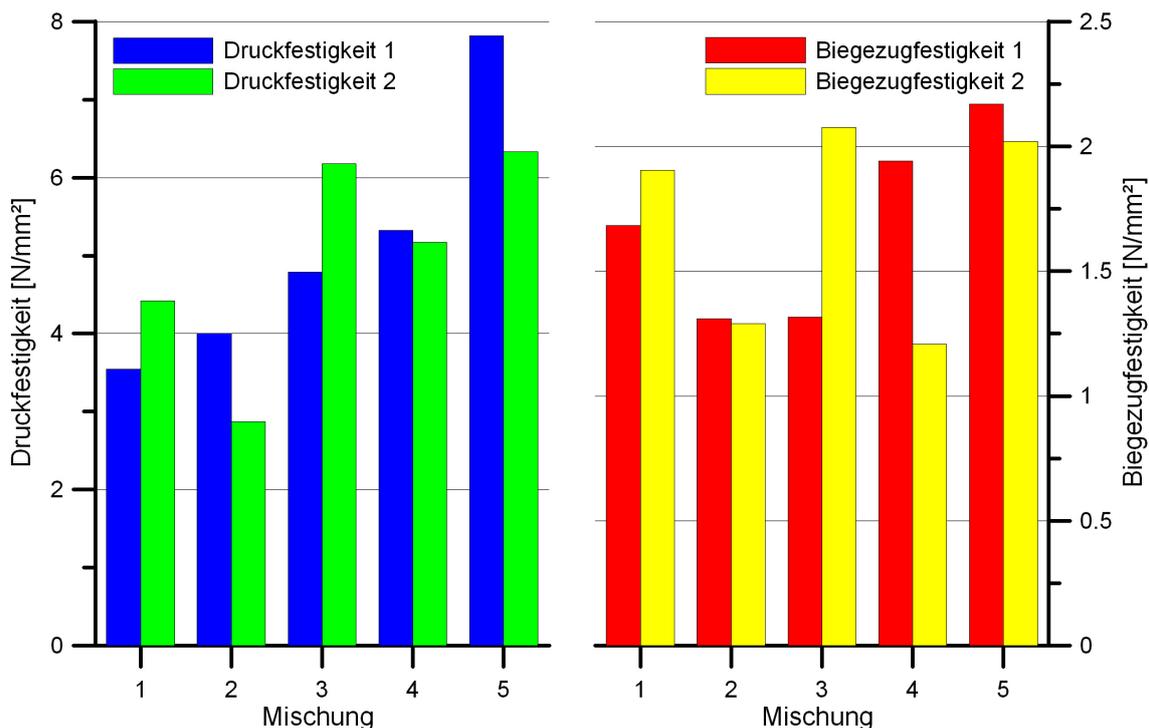


Abbildung 5.25: Einzelbeispiele für Festigkeitsschwankungen innerhalb einer Mischung

Auf Grund dieser großen Schwankungsbreiten bei den Einzelversuchen (Druckfestigkeiten bis 28 %, Biegezugfestigkeiten bis 37 %) erfordern zuverlässige Aussagen zu Einflüssen auf die Festigkeit eine breite Datengrundlage. Wegen der großen Anzahl untersuchter Rezepturparameter und der daraus resultierenden geringen Anzahl von Versuchen je Parameter, reicht die vorhandene Daten-

grundlage für eine Untersuchung der Einflüsse einzelner Rezepturparameter auf die Festigkeiten nicht aus. Eine Ausnahme bilden hier die verwendeten CEM I-Zemente (Z 3 bis Z 5), die jeweils für eine große Zahl einzelner Versuche verwendet wurden. Für diese lagen ausreichend viele Ergebnisse zu Druck- und Biegezugfestigkeiten vor, um eine differenzierte Betrachtung, aufgeschlüsselt nach der Zementart, durchzuführen. Separat für jeden Zement wurde durch lineare Regression eine mathematische Beziehung zwischen Rohdichte und Festigkeit ermittelt. Durch den Vergleich dieser Rohdichte-Festigkeits-Beziehungen kann der Zementeinfluss auf die Schaumfestigkeit abgeschätzt werden.

In den Abbildungen 5.26 und 5.27 sind die Druck- bzw. Biegezugfestigkeiten, nach Zementarten unterschieden, über die Rohdichten aufgetragen. Zusätzlich sind die Geraden als Ergebnis der linearen Regression dargestellt.

Bei Betrachtung der Druckfestigkeitswerte ergibt sich trotz der erheblichen Streuungen eine erkennbare Differenzierung entsprechend der Zementfestigkeitsklassen. Dieses drückt sich auch in der Lage der Regressionsgeraden aus, insbesondere jedoch in den erreichten maximalen Druckfestigkeiten der verschiedenen Zemente, jeweils bezogen auf die Rohdichte (vgl. Abbildung 5.28). Während die Streuungen in Richtung geringerer Festigkeiten sehr ausgeprägt sind, sind sie nach oben beschränkt. Diese obere Schranke der Festigkeiten unterscheidet sich für die drei Zemente deutlich. Es ist davon auszugehen, dass sie die mit der jeweiligen Zementart maximal erreichbare Festigkeit darstellt. Mit abnehmender Rohdichte verringert sich sowohl die maximal erreichbare als auch die mittlere Festigkeit der Zementschäume. Auch der Einfluss der Zementart auf die Festigkeit nimmt ab.

Die Ergebnisse der Biegezugprüfungen streuen aus den o.g. Gründen noch wesentlich stärker als die der Druckfestigkeiten. Hier lassen sich keine zementspezifischen Einflüsse feststellen. Zwar ergibt die Regressionsrechnung auch hier für den CEM I 52,5 R bei größeren Rohdichten die höchsten mittleren Festigkeiten, alle Ausgleichsgeraden liegen jedoch sehr nah beieinander und schneiden sich im technisch interessanten Bereich der Rohdichten um $0,6 \text{ g/cm}^3$. Auch eine deutliche Differenzierung hinsichtlich einer maximal erreichbaren Biegezugfestigkeit, entsprechend den Beobachtungen bei den Druckfestigkeiten, ist nicht erkennbar.

Ein Einfluss der Zementfestigkeitsklasse auf die Biegezugfestigkeit von Zementschäumen kann somit anhand der gewonnenen Daten nicht festgestellt werden. In Bezug auf die Druckfestigkeiten ist ein deutlicher Einfluss in Form

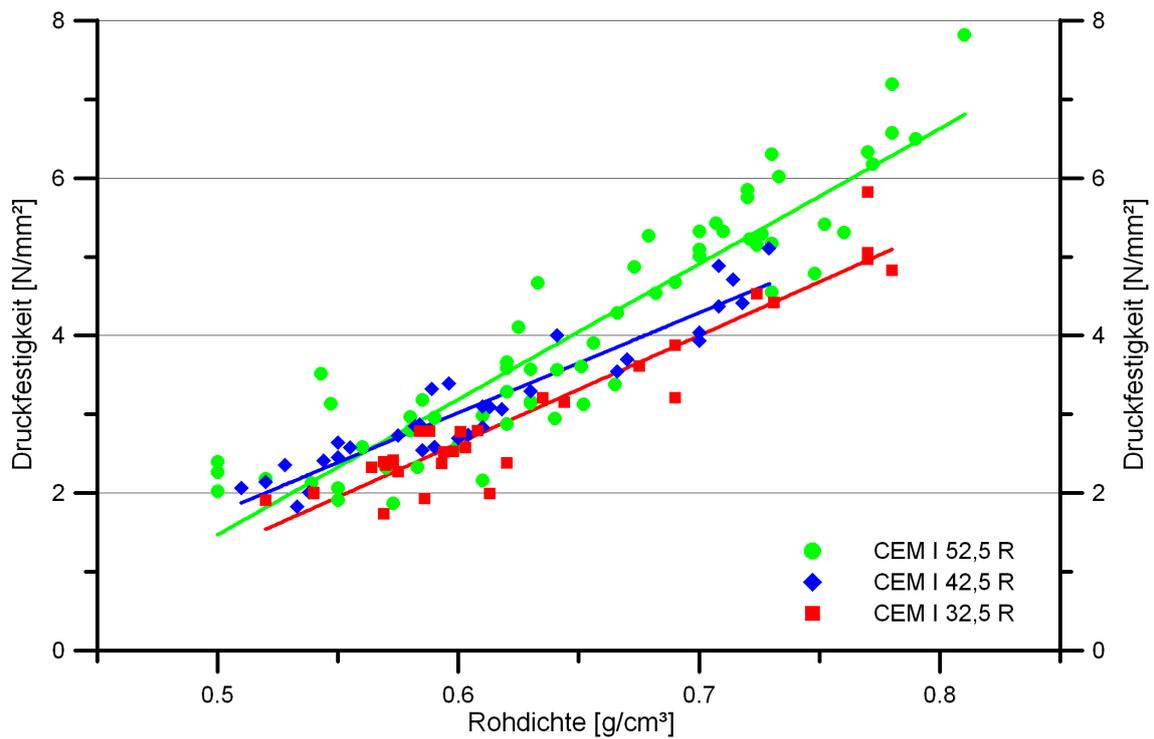


Abbildung 5.26: Zementeinfluss auf die Druckfestigkeiten aufgeschäumter Zementleime (Regression)

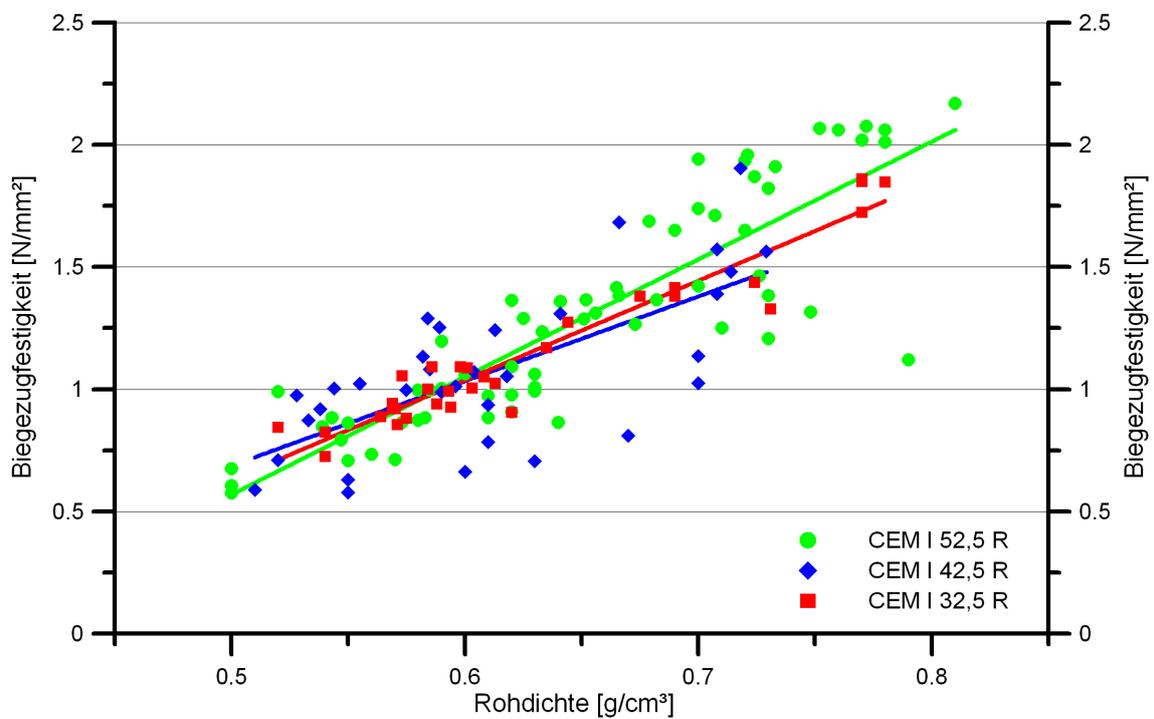


Abbildung 5.27: Zementeinfluss auf die Biegezugfestigkeiten aufgeschäumter Zementleime

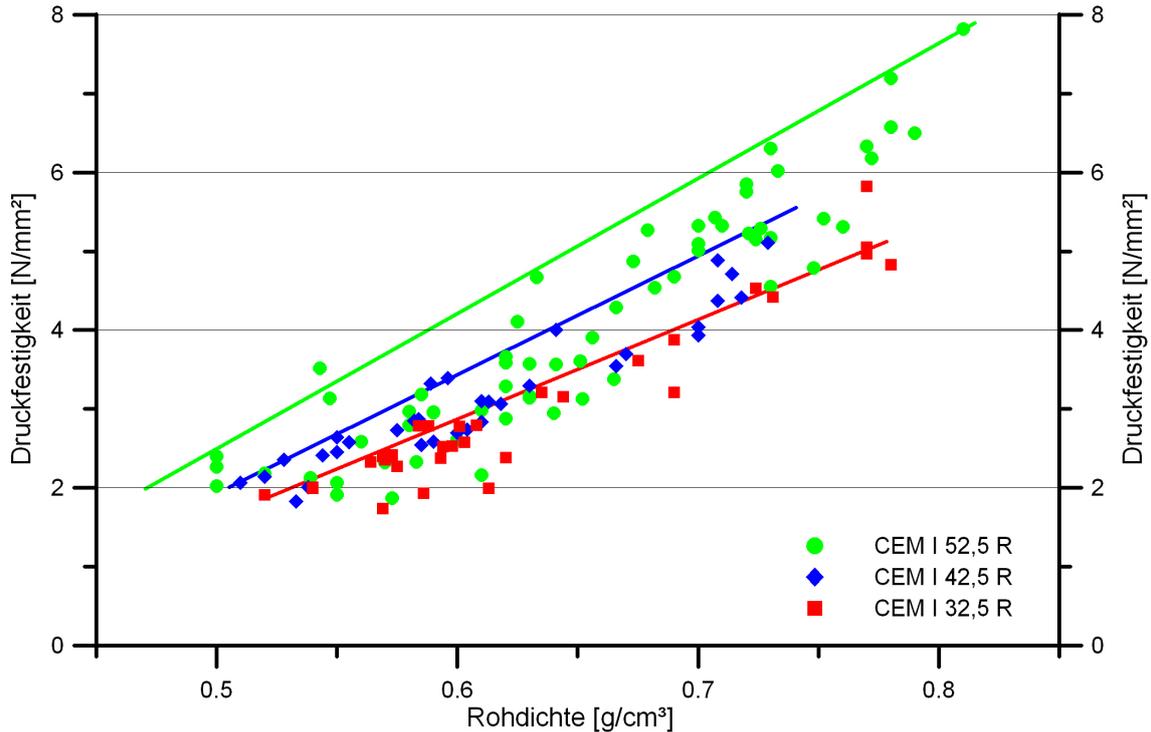


Abbildung 5.28: Zementeinfluss auf die Druckfestigkeiten aufgeschäumter Zementleime (maximal erreichbare Festigkeiten)

unterschiedlicher, maximal erreichbarer Festigkeiten erkennbar. Angesichts der großen Schwankungen ist dieser jedoch derzeit nicht oder nur bedingt technisch nutzbar, da im Allgemeinen auf der sicheren Seite liegend von pessimistischen Werten ausgegangen werden muss. Die minimalen ermittelten Druckfestigkeiten, bezogen auf die Rohdichte, waren jedoch für alle Zemente nahezu identisch, so dass hier bislang keine Differenzierung sinnvoll ist. Gelingt es mittelfristig durch verbesserte Maschinenteknik und weiter optimierte Rezepturen die Homogenität der Zementschäume zu erhöhen und damit die Schwankungsbreiten der Festigkeiten zu reduzieren, kann eine direkte Beeinflussung der Festigkeit durch die Wahl des verwendeten Zements erreicht werden.

Bei der Bewertung dieser Ergebnisse und insbesondere der erheblichen Streuungen ist zu beachten, dass in die Entstehung der einzelnen Messwerte auch Einflüsse aus unterschiedlichen Rezepturen und Ausgangsstoffen eingeflossen sind.

5.4.2 Untersuchungen der Porenstruktur

Neben den bislang vorwiegend untersuchten Rohdichtewerten bzw. Luftgehalten der Zementschäume, ist auch die Porenstruktur ein charakteristisches Merkmal mit Auswirkungen auf weitere Materialeigenschaften und mögliche Anwendungsgebiete. Sie ist gekennzeichnet durch die Porengrößenverteilung und den Anteil untereinander verbundener Poren (vorwiegend offen- oder geschlossensorige Schäume).

Für die Bestimmung von Daten zur Porenstruktur sind in der Betontechnologie drei grundlegend verschiedene Verfahren bekannt:

- optische Ermittlung von Kennwerten zur Porenstruktur an (präparierten) Schnittflächen von erhärteten Probekörpern
- Intrusionsverfahren, bei denen die von der Oberfläche erhärteter Probekörper zugänglichen Porenräume unter Druck mit einem Fluid gefüllt werden; in der Betontechnologie wird in der Regel die Quecksilberdruckporosimetrie verwendet
- Extrahieren und Erfassen von Luftblasen aus einer repräsentativen Frischbetonprobe (Verfahren Air-Void-Analyser)

In den folgenden Abschnitten werden für alle drei Verfahren die Möglichkeiten und Grenzen bezüglich einer Verwendung zur Analyse aufgeschäumter Zementleime erörtert. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden optische Luftporenuntersuchungen durchgeführt. Daher wird auf diese detaillierter eingegangen, um die Aussagekraft der gewonnenen Ergebnisse angemessen beurteilen zu können.

Optische Luftporenuntersuchung

Als weit verbreitete Vorgehensweise für die Ermittlung von Luftporenkennwerten in der Betontechnologie steht die optische Ermittlung von Kennwerten zur Porenstruktur an (präparierten) Schnittflächen von erhärteten Probekörpern zur Verfügung. Hierunter fallen sowohl manuelle mikroskopische Luftporenuntersuchungen als auch computergestützte Bildanalyse-Systeme. Letztere haben den Vorteil, dass sie deutlich schneller arbeiten und in der Lage sind, zweidimensionale Daten zu erfassen und auszuwerten. Dadurch ist es möglich, neben

Porendurchmessern auch Porenformen zu erkennen, um z.B. zwei miteinander verbundene Poren als solche zu registrieren. Nachteile dieser Bildanalyssysteme liegen darin, dass sie in hohem Maße von der Qualität der Bilddaten abhängen und daher in der Regel einer sehr aufwändigen Probenpräparation bedürfen [7]. Darüber hinaus gibt es im Bereich der Betontechnologie bislang noch keine genormten Verfahren zur bildanalytischen Auswertung von Porenstrukturen, sondern nur Einzellösungen. Als Hauptursachen dafür sind die sehr aufwändige Kalibrierung und die hohe Fehleranfälligkeit (je nach Aussagekraft der Bilddaten) zu sehen.

Deutlich etablierter ist die Sehnenschnittmethode, die daher im Rahmen dieser Arbeit zur Anwendung gekommen ist. Sie wird bereits seit vielen Jahrzehnten zur Ermittlung von Porositätsdaten am Festbeton verwendet und ist unter anderem in Heft 422 des DAfStb [24] beschrieben. Bei der Sehnenschnittmethode wird ein System paralleler Messlinien auf einer durch ein Stereomikroskop betrachteten Prüffläche abgefahren. Während der Messung werden manuell Anzahl und Längen der auf der Messlinie liegenden Porensehnen erfasst. Aus der Summe der Porensehnenlängen lässt sich der Luftgehalt abschätzen. Die Verteilung der gemessenen Porensehnenlängen gibt einen Anhaltspunkt für die Porengrößenverteilung. Zu beachten ist jedoch, dass die im Schnitt sichtbaren Porensehnenlängen nicht den tatsächlichen Durchmesser der Pore darstellen. Abbildung 5.29 stellt die drei möglichen Fälle schematisch dar, bei denen Poren oberhalb (links), in (mitte) und unterhalb (rechts) ihrer maximalen Ausdehnung geschnitten werden. Dennoch sind mit statistischen Mitteln, auf die hier nicht näher eingegangen wird, Rückschlüsse auf die Porengrößenverteilung möglich.

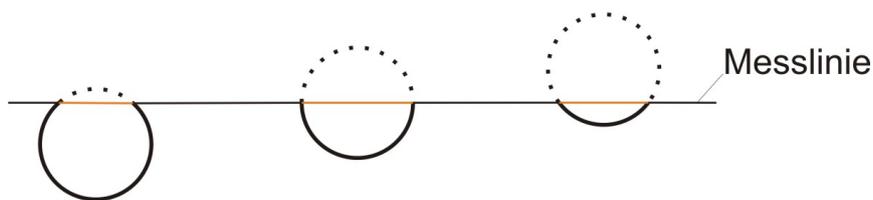


Abbildung 5.29: Einfluss der Lage der Messlinie auf die ermittelten Porensehnenmittellängen

Auf Grund der gewählten Probekörpergeometrie (Prismen mit $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) und den teilweise durch Entlüften, Schaumzerfall oder Schwinden deformierten Probekörperoberflächen wurden die vorgegebenen Messtrecken, abweichend von den Vorgaben aus [24] wie in Abbildung 5.30 dargestellt festgelegt.

Die erste Messlinie liegt im Abstand von 3 mm von der Bodenfläche des Probekörpers. Es folgen dann weitere sechs Messlinien jeweils im Abstand von 4 mm.

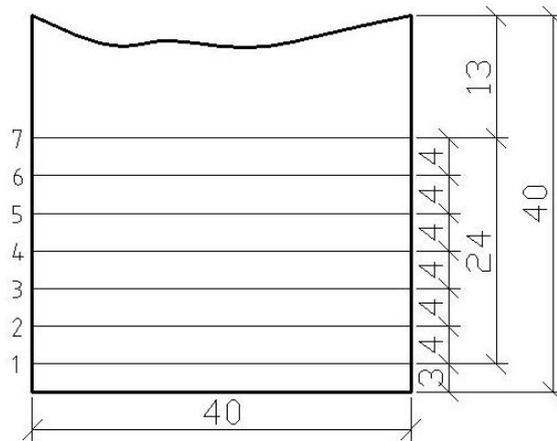


Abbildung 5.30: Messlinien zur Untersuchung der Porenstruktur

Die daraus resultierende Verringerung der gesamten Messstrecke gegenüber dem für Beton vorgegebenen Verfahren wird z.T. dadurch kompensiert, dass bei normalen Betonen ein erheblicher Teil der Messstrecke auf Gesteinskörner entfällt und somit nicht zu einer Aussage über die Matrixporigkeit beiträgt.

Die Probenvorbereitung konnte wegen der geringen Festigkeit der Zementschäume manuell erfolgen. Von den Prismen wurde mit einer feinen Säge eine ca. 4 cm dicke Scheibe abgeschnitten. Die Schnittfläche wurde zunächst mit gröberem und dann mit sehr feinem Schleifpapier nahezu ohne Druck geschliffen. Dabei war darauf zu achten, dass die z.T. sehr feinen und fragilen Lamellen zwischen den Poren nicht ausbrachen. Im Anschluss wurden die angeschliffenen Flächen mit Druckluft vom Staub befreit.

Die Poren wurden, wie zuvor beschrieben, nach dem Sehnenschnittverfahren aufgenommen. Die Umrechnung der Porensehnenlängen in eine fiktive Porenradienverteilung erfolgt durch ein Auswertungsprogramm auf Grundlage einer hinterlegten statistischen Berechnung gemäß [24]. Dazu werden die gemessenen Porensehnen nach ihrer Länge in Klassen eingeteilt. Die Klassenbreiten variieren zwischen 0,01 mm für die feinsten Porensehnen von 0 bis 0,01 mm und 1,00 mm für Porensehnen zwischen 3 und 4 mm Länge.

Da das Verfahren in der beschriebenen Form primär auf die Ermittlung von Mikroluftporen bis zu einem Durchmesser von 0,3 mm ausgerichtet ist (A300-Wert nach [24]), während im Fall der Zementschäume der wesentliche Porenanteil im Bereich von 0,3 - 1,5 mm liegt, war zunächst eine grundsätzliche Überprüfung der Anwendbarkeit des Verfahrens erforderlich. Dazu wurden die optisch ermittelten Gesamtluftgehalte einem aus der Rohdichte rechnerisch ermittelten Luft-

gehalt gegenüber gestellt. Als Basis für den rechnerisch ermittelten Wert des Luftgehalts kommen entweder die Schaumrohddichte und die Dichte des Zementsteins im erhärteten Zustand oder im frischen Zustand unmittelbar nach dem Aufschäumen in Frage. Zwar können bei Verwendung der Daten von den frischen Zementschäumen etwaige Veränderungen während der Erstarrungs- und Erhärtungsphase nicht erfasst werden, dafür ist die Leimzusammensetzung einschließlich der resultierenden Rohddichte relativ genau bekannt. Im erhärteten Zustand ist eine Ofentrocknung erforderlich, um einen definierten Feuchtezustand zu erhalten, bei dem jedoch auch nur abgeschätzt werden kann, wie groß der verbleibende Anteil gebundenen Wassers im Zementstein ist. Darüber hinaus werden bei einer Ermittlung der Porosität an der trockenen Probe aus Probekörperdichte und Dichte der Ausgangsstoffe Schrumpf- und Kapillarporenräume mit erfasst, die bei der mikroskopischen Luftporenuntersuchung nicht erkannt werden. Daher sind die Ergebnisse nicht miteinander vergleichbar. Nach Abwägen der Vor- und Nachteile wurde der aus der Rohddichte des frischen Schaums errechnete Luftgehalt als Referenz ausgewählt und in der folgenden Abbildung 5.31 den optisch ermittelten Werten gegenübergestellt.

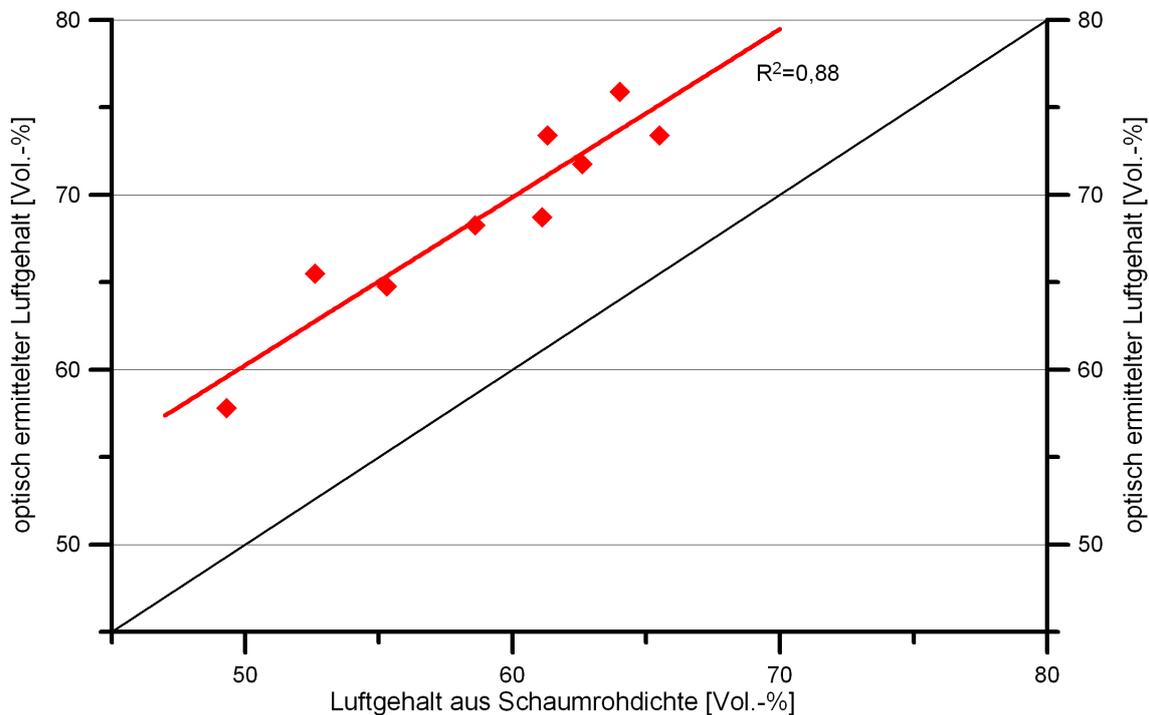


Abbildung 5.31: Vergleich zwischen den aus der Schaumrohddichte und den optisch ermittelten Luftgehalten

Anhand der Grafik ist deutlich zu erkennen, dass ein linearer Zusammenhang zwischen den verschiedenen Luftgehalten angenommen werden kann. Das Er-

gebnis der linearen Regressionsrechnung bestätigt dies durch ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,88$. Die Steigung der Regressionsgerade nahe „1“ weist ebenfalls auf eine direkt proportionale Abhängigkeit hin. Auffällig ist allerdings, dass alle optisch ermittelten Luftporengehalte deutlich über den aus der Schaumrohddichte berechneten liegen. Daher muss von einem systematischen Fehler ausgegangen werden, der sich auf alle Proben gleich oder ähnlich ausgewirkt hat. Hier kommen im Wesentlichen drei Aspekte in Frage:

- Differenzen zwischen den angenommenen und den tatsächlichen Rohdichten der Ausgangsstoffe, die zu einer fehlerhaften Ermittlung der Leimrohddichten führen
- eine Verringerung des Leinvolumens durch Hydratation oder Austrocknung, die sich in einer Reduzierung der Lamellendicken und somit in einer Vergrößerung der Porendurchmesser niederschlägt
- eine systematische Überschätzung des Luftgehaltes im Zuge der statistischen Auswertung des Porensehnschnittverfahrens

Der erste Punkt kann trotz sorgfältiger Bestimmung der einzelnen Werte nicht gänzlich ausgeschlossen werden, da es nicht nur zwischen verschiedenen Lieferchargen, sondern zum Teil auch innerhalb von Lieferchargen (z.B. lagerungsbedingt) immer wieder zu geringfügigen Veränderungen der Stoffparameter kommen kann. Punkt zwei wird durch das bereits erläuterte Auftreten sich überschneidender Kugelporen bestätigt, die ebenfalls auf eine Ausdünnung der Schaumlamellen zurückzuführen sind. Da der Porenradius in der dritten Potenz in das Porenvolumen eingeht, reichen bereits geringe Veränderungen der Porenradien aus, um deutliche Einflüsse auf den Luftgehalt zu bewirken. Hinsichtlich des dritten Punktes basiert die statistische Auswertung der klassifizierten Sehnenlängen auf einer weitgehend gleichverteilten Porenradienverteilung innerhalb der Klassengrenzen. Da aufgeschäumte Zementleime zum Zeitpunkt der Herstellung, bedingt durch das Herstellverfahren, eine relativ einheitliche Porengröße aufweisen, und die Veränderungsprozesse der Schaumstruktur im Wesentlichen natürlichen Gesetzmäßigkeiten und nur z.T. dem Zufall unterliegen, kann es zu starken Abweichungen von der gleichverteilten Porenradienverteilung kommen. Da der maßgebende Teil der Poren(-sehnen) dem Bereich der großen, sehr grob klassifizierten Sehnenlängen zuzuordnen ist, wirken sich diese Fehler besonders stark aus und können je nach Porengrößen zu einer systematischen Über- oder Unterschätzung der Luftgehalte führen.

Darüber hinaus besteht ein systemimmanentes Problem bei der Erfassung und Auswertung der Porensehnenlängen für sich überschneidende Kugelporen. Da diese z.T. erheblich von der dem Modell zugrunde liegenden Kugelform der Poren abweichen, kann es je nach Lage der Poren zu der in Abbildung 5.32 veranschaulichten Fehlinterpretation kommen. Verläuft die Messlinie durch den Verbindungsbereich der Poren, werden ggf. zwei verbundene kleine Poren als eine große Pore identifiziert. Die Folge ist eine Überschätzung des vorhandenen Porenvolumens bzw. Luftgehalts. Besonders kritisch ist dieser Effekt, wenn derartige Porenzusammenschlüsse nicht gleichmäßig bei allen Porengrößen auftreten, sondern gehäuft z.B. bei großen Poren. In diesem Fall werden die Porengrößen nebst dem Gesamtluftgehalt nicht nur systematisch überschätzt, es wird auch die Porengrößenverteilung fehlerhaft.

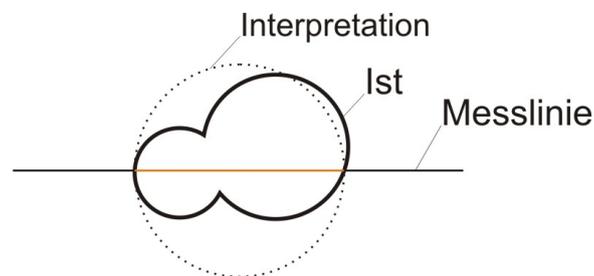


Abbildung 5.32: Fehlerhafte Interpretation verbundener Poren bei der Sehnenschnittmessung

Daher ist davon auszugehen, dass die eindimensionale Erfassung der Porensehnen bei sehr hohen Luftgehalten und insbesondere bei untereinander verbundenen Poren keine hinreichend präzise Beschreibung der Porenstrukturen zulässt. Hier wäre ein zweidimensionales Verfahren, z.B. mittels automatischer Bildanalyse, wesentlich zielführender.

Eine quantitative Aufteilung der Differenz der Luftgehalte, die nach den verschiedenen Verfahren ermittelt wurden, auf die beschriebenen potenziellen Fehlerquellen ist nur durch weitergehende, umfangreiche Untersuchungen und statistische Auswertungen möglich. Diese waren nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Die Abweichungen der einzelnen Punkte gegenüber der Regressionsgeraden sind vergleichsweise gering. Dennoch gibt es auch für diese eine Reihe möglicher Ursachen. Dazu gehören sich ergebende Fehler sowohl durch mangelhafte Probenvorbereitung als auch durch eine fehlerhafte Porengrenzenbestimmung bei der optischen Untersuchung, Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Leimroh-dichten und andere Einflüsse durch die ausführende Person. Auch daraus ergibt sich eine Schwächung der Aussagekraft der Ergebnisse dieses Messverfahrens.

Zieht man alle vorgenannten Fehlerpotenziale, insbesondere die der sehr groben Klassifizierung der mehrheitlich großen Poren und der fehlerhaften Erfassung verbundener Poren in Betracht, wird deutlich, dass die optische Luftporenuntersuchung mittels Sehnenschnittmethode je nach Schaumstruktur z.T. sehr unzuverlässige Werte liefert. Insofern kann sie die Luftgehaltsbestimmung über die Dichte durch einen groben Eindruck von der Porengrößenverteilung aufgeschäumter Zementleime ergänzen, liefert jedoch keine belastbaren Ergebnisse. Diese eingeschränkte Aussagekraft des Verfahrens rechtfertigt daher nicht den erheblichen Aufwand einer systematischen Untersuchung großer Probekörperzahlen. Dafür sind Weiterentwicklungen der optischen Luftporenuntersuchung erforderlich.

Quecksilberdruckporosimetrie

Bei den Intrusionsverfahren handelt es sich um Verfahren zur Ermittlung der Gesamtporosität sowie der Porenstruktur an Festbetonproben. Im Vakuum bzw. durch Unterdruck wird den Probekörpern zunächst die im Porensystem befindliche Luft entzogen. Anschließend wird ein fluider Stoff unter Druck in das evakuierte Porensystem der Probe eingetrieben. Um aussagekräftige Versuchsergebnisse zu erhalten, ist bei der Wahl des fluiden Stoffes auf eine geringe Kompressibilität zu achten. Es sollten keine chemischen Wechselwirkungen zwischen Beton/Zementstein und dem Fluid auftreten und der Stoff sollte über ein definiertes, möglichst schwaches Benetzungsverhalten verfügen, um ein unkontrolliertes kapillares Saugen zu vermeiden. Diese Vorgaben führen dazu, dass Intrusionsversuche in der Betontechnologie unter Verwendung von Quecksilber (Quecksilberdruckporosimetrie) durchgeführt werden. Mit steigendem Druck werden dabei immer kleinere (Kapillar-)Poren mit Quecksilber gefüllt. Kann ein genügend hoher Druck appliziert werden, wird so annähernd das gesamte von der Porenoberfläche zugängliche Porenvolumen gefüllt. Durch Messung der Korrelation von Druck und in die Probe eingebrachtem Quecksilbervolumen kann (basierend auf einem Modell zylindrischer Kapillarporen) die Gesamtporosität sowie die Porengrößenverteilung ermittelt werden. Mit den üblichen Geräten zur Quecksilberdruckporosimetrie ist die Anwendbarkeit dieses Verfahrens auf Porengrößen zwischen ca. $1,8 \text{ nm}$ bis ca. $300 \mu\text{m}$ beschränkt [57, 84, 59]. Wie bereits die Abbildung 5.15 und 5.19 verdeutlichen, weisen die untersuchten Zementschäume einen erheblichen Porenanteil oberhalb von $300 \mu\text{m}$ auf. Daher ist dieses Verfahren nicht geeignet, um die Porenstruktur der auf-

geschäumten Zementleime zuverlässig zu ermitteln. Weitere Schwierigkeiten bei der Anwendung dieses Verfahrens für Zementschäume sind auch durch druckbedingte Schädigungen der inneren Struktur zu erwarten. Die z.T. sehr dünnen und spröden Lamellen zwischen einzelnen, geschlossenen Poren können wegen der hohen Belastungen durch Unterdruck (Evakuierung des Porensystems) und Überdruck (Quecksilberintrusion) bei der Prüfung zerstört werden und die Ergebnisse verfälschen. Ebenfalls spricht gegen die Anwendung dieses Verfahrens, dass seine mathematischen Grundlagen, wie schon erwähnt, auf einem Modell zylindrischer Kapillarporen beruht, während hier vorwiegend Kugelporen detektiert werden sollen. Daher wurde auf Untersuchungen der Porenstruktur mittels Quecksilberdruckporosimetrie verzichtet.

Air-Void-Analyser

Das Extrahieren von Luftblasen aus einer Frischbetonprobe erfolgt z.B. mit dem Air-Void-Analyser [34, 57]. Nach einer repräsentativen Probennahme wird die Probe in eine Flüssigkeit mit definierter Viskosität eingebracht. Die Luftporen werden mittels eines Magnetührers aus der Frischbetonprobe ausgetrieben. Durch die erhöhte Viskosität der umgebenden Flüssigkeit wird das Aufsteigen der Blasen entsprechend dem *Stokeschen* Gesetz (vgl. Gleichung 2.6) wesentlich verlangsamt. Da sich die Auftriebsgeschwindigkeit nach der Auftriebskraft und der ihr entgegenwirkenden Reibungskraft richtet, ist die Auftriebsgeschwindigkeit stark von der Blasengröße abhängig. Am Ende der Blasensäule befindet sich ein Auftriebsrekorder, der das Luftvolumen der aufgestiegenen Blasen integral über die Zeit ermittelt. Aus der jeweiligen Verweildauer in der Blasensäule kann dann auf die Blasengröße zurückgeschlossen werden und aus den Blasengrößen und der Veränderung des detektierten Luftvolumens im korrelierenden Zeitintervall kann die Blasenanzahl zu einer bestimmten Blasengröße ermittelt werden.

Die Aussagekraft dieses Verfahrens basiert auf drei zentralen Annahmen. Zum Ersten müssen die Luftblasen nahezu zeitgleich mit dem Einschalten des Magnetührers vollständig aus der Frischbetonprobe ausgetrieben werden. Zum Zweiten muss die Mischintensität des Magnetührers so gering sein, dass es während des Austreibens aus der Frischbetonprobe nicht zu scherkraftinduzierten Veränderungen der Blasenstrukturen kommen kann. Zum Dritten muss der Luftgehalt so niedrig sein, dass Kollisionen zwischen Blasen, die zur Koaleszenz führen, so selten sind, dass sie keinen nennenswerten Einfluss auf die ermittelte

Porengrößenverteilung haben. Diese Annahmen können bei der Verwendung des Air-Void-Analysers für aufgeschäumte Zementleime nicht als zutreffend vorausgesetzt werden. Wegen der deutlich höheren erforderlichen Zähigkeit der Leimkomponente eines aufgeschäumten Zementleims, erfordert der Aufschluss aller Blasen eine sehr viel höhere Mischenergie und eine längere Mischdauer. Unter diesen Bedingungen kann, auch wegen der höheren Luftgehalte und tendenziell größeren Luftblasen als in normalen Betonen, nicht mehr davon ausgegangen werden, dass die Porenstruktur beim und nach dem Austreiben aus dem Leim unverändert bleibt. Stattdessen ist wegen der in Abschnitt 4.2.3 beschriebenen Zusammenhänge zwischen der Viskosität der flüssigen Phase, der eingebrachten Mischenergie und der resultierenden Porengrößen von einer deutlichen Veränderung der Porenstruktur auszugehen. Daher ist dieses Verfahren für aufgeschäumte Zementleime nicht geeignet. Da keine weiteren Verfahren zur Ermittlung der Porenstruktur am Frischbeton bzw. frischen Zementleim bekannt sind, konnten in diesem Bereich keine Untersuchungen durchgeführt werden.

5.4.3 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen

Durch die Rasterelektronenmikroskopie lässt sich ein direkter Einblick in die Gefügestruktur der Zementschäume gewinnen. So ist es insbesondere möglich, Gefügebesonderheiten im Bereich der Porenwandungen sichtbar zu machen. Ergänzend zu der Information über die Oberflächegeometrie ist mit Hilfe der EDX-Analyse (Energy Dispersive X-ray Analysis = energiedispersive Röntgenspektroskopie) zusätzlich die Detektion unterschiedlicher chemischer Elemente in der Fläche möglich. Diese Technik ermöglicht es, die Verteilung von charakteristischen Elementen auf der untersuchten Fläche zu ermitteln und den Bilddaten gegenüberzustellen bzw. sie mit diesen zu überlagern. So können über die Form hinaus zuverlässige Rückschlüsse auf die Art bzw. Herkunft verschiedener Strukturen gezogen werden. Um gute Bilder zu ermöglichen, muss eine elektrische Aufladung der Probenoberfläche verhindert werden. Für nicht-leitende Porenoberflächen (wie in diesem Fall die Zementsteinoberfläche) wird dazu die Leitfähigkeit z.B. durch Aufbringen einer dünnen Goldschicht (Sputtern) erhöht.

Abbildung 5.33 gibt einen Überblick über die Bruchfläche eines Zementschaums. Deutlich erkennbar ist der relativ hohe Porenanteil, der sich aus Poren mit Durchmessern zwischen ca. $50 \mu\text{m}$ und 1mm zusammensetzt. Die größeren Poren weisen fast ausnahmslos Verbindungen zu benachbarten Poren auf. Für

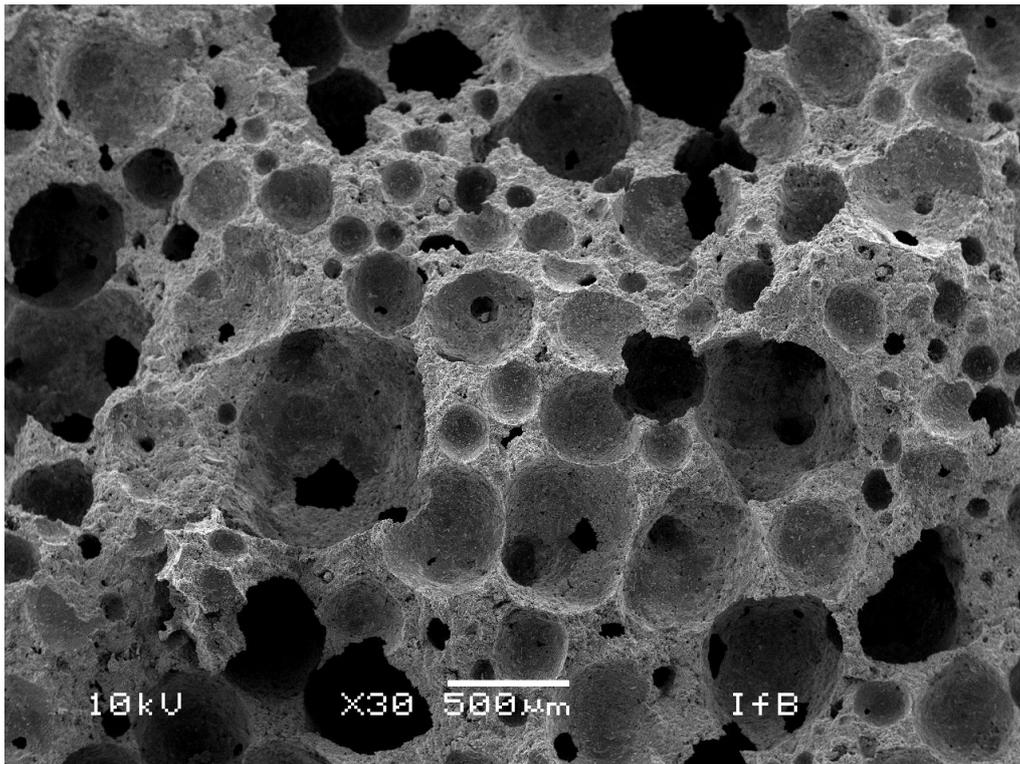


Abbildung 5.33: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Bruchfläche eines Zementschaums bei geringer (30facher) Vergrößerung

kleinere Poren gilt dieses nicht, wobei zu berücksichtigen ist, dass jeweils nur ein Teil der Porenwandung auf dem Bild sichtbar ist. Zur Homogenität der Poren- und Porengrößenverteilung kann auf Grund des begrenzten Bildausschnitts keine repräsentative Aussage gemacht werden. Auffällig ist eine Reihe relativ großer Poren oberhalb der Maßstabseinblendung, deren Form z.T. deutlich von der sonst vorherrschenden kugeligen Form abweicht. Offensichtlich befindet sich der Schaum im erhärteten Zustand hier bereits an der Grenze zwischen einem Kugel- und einem Polyederschaum. Das deutet neben der großen Zahl untereinander verbundener Poren ebenfalls darauf hin, dass die vorliegende Zementschaumprobe einen Luftgehalt an der oberen Grenze des für die Herstellung und Verarbeitung Möglichen aufweist.

Die Abbildungen 5.34 und 5.35 zeigen ein Detail der gleichen Probe bei 200facher bzw. 1000facher Vergrößerung. Abbildung 5.34 wird dominiert von drei großen, nur teilweise abgebildeten Poren in der oberen und unteren rechten Ecke und am linken Bildrand sowie von zwei kleineren Poren unterhalb der Bildmitte bzw. oben links. Erkennbar sind im Wesentlichen zwei verschiedene Strukturen, einmal die des dichten, hydratisierten Zementsteins im Bereich der Bruchfläche sowie eine etwas plattige bzw. schuppige Struktur, die primär im

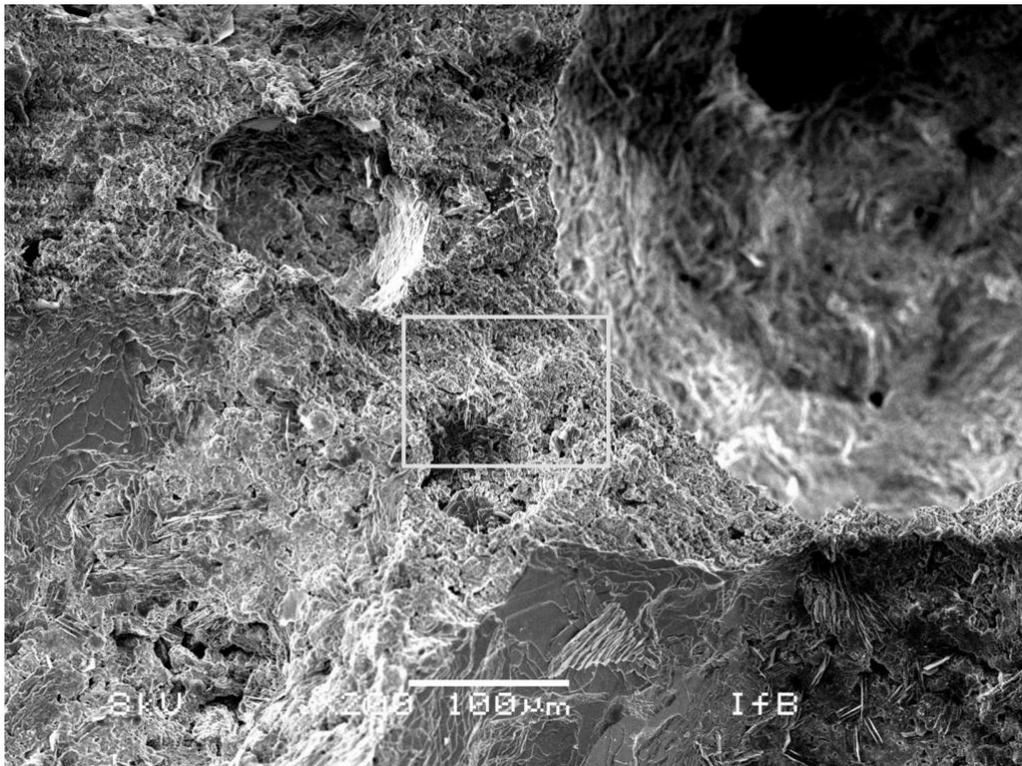


Abbildung 5.34: Aufnahme der Bruchfläche eines Zementschaums bei 200facher Vergrößerung

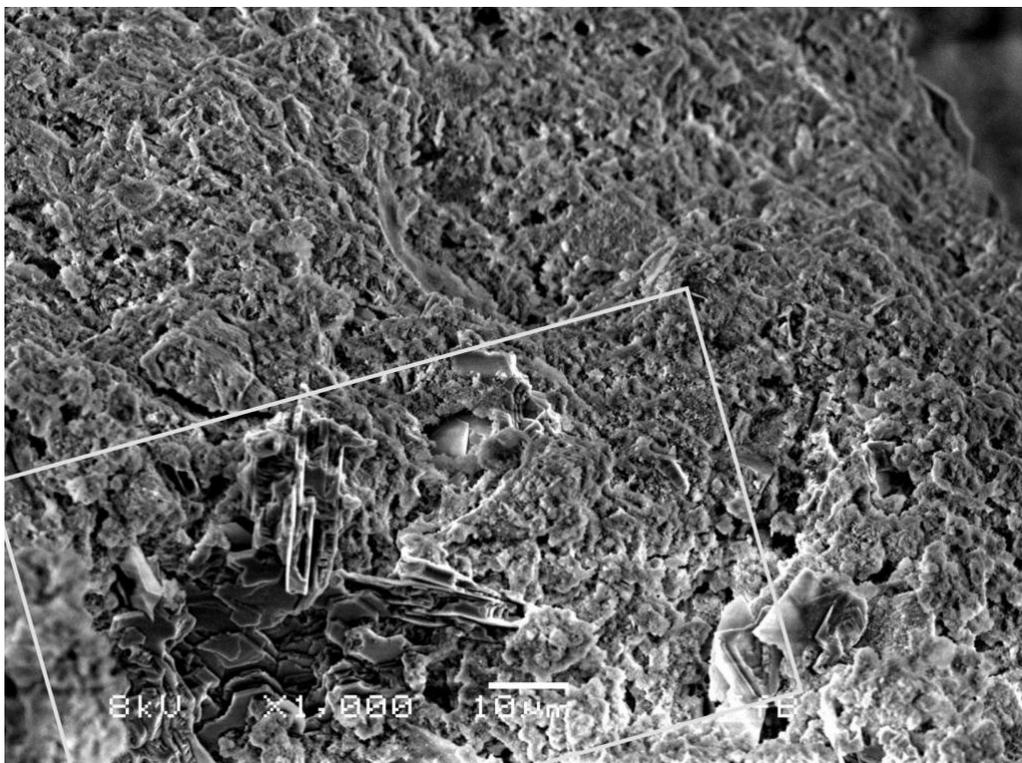


Abbildung 5.35: Detail aus Abbildung 5.34 bei 1000facher Vergrößerung

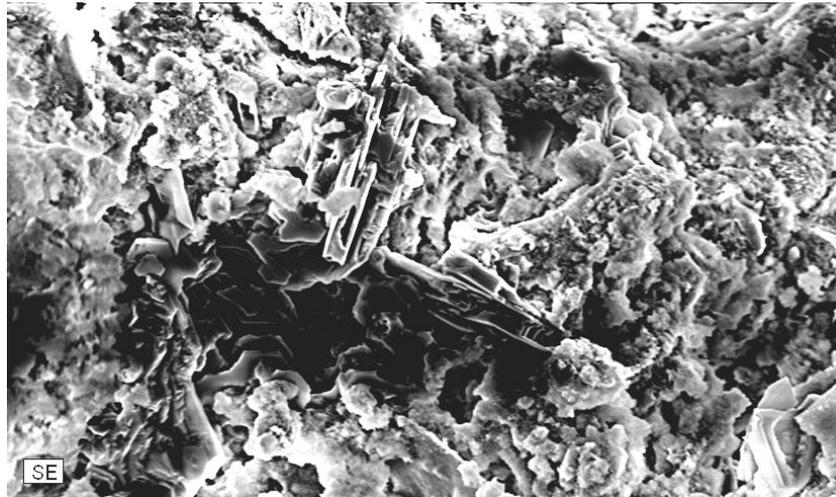


Abbildung 5.36: Bildausschnitt der EDX-Analyse aus Abbildung 5.35

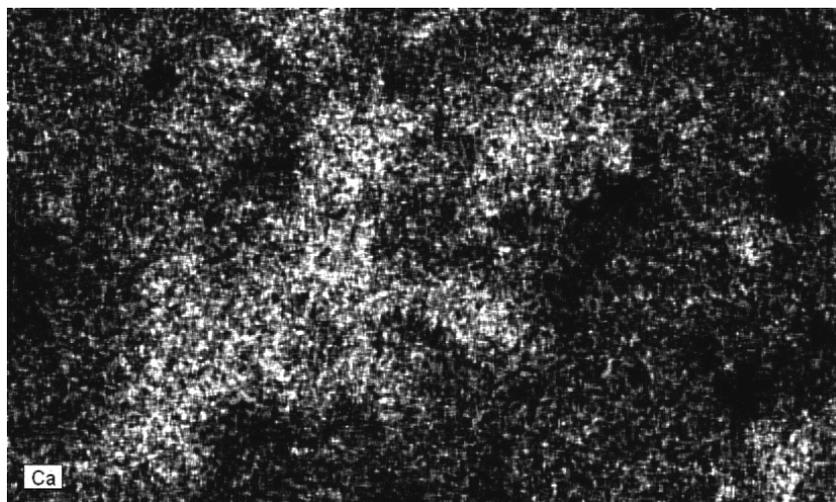


Abbildung 5.37: Verteilung des Elements Calcium (Ca) im untersuchten Bildausschnitt

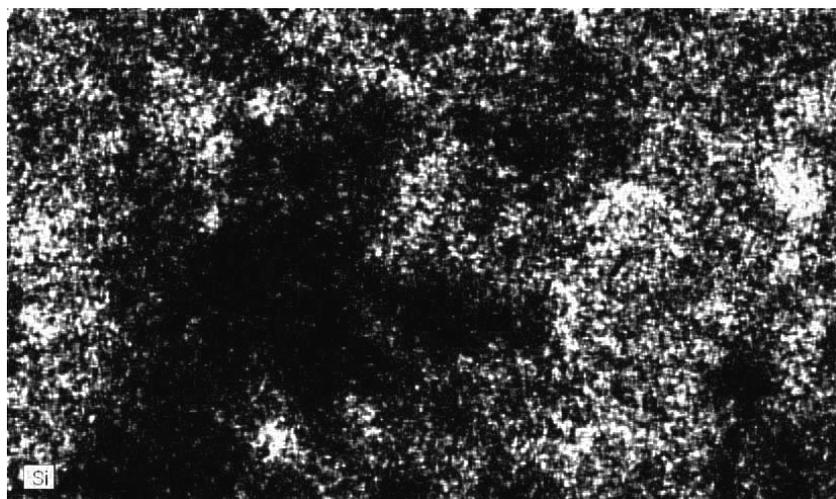


Abbildung 5.38: Verteilung des Elements Silicium (Si) im untersuchten Bildausschnitt

Bereich der Porenwandungen anzutreffen ist.

Der Bildausschnitt von Abbildung 5.35 erstreckt sich von der oberen Hälfte der kleinen zentralen Pore bis zum Rand der großen Pore oben rechts in Abbildung 5.34. Auch hier sind wieder die plattigen Strukturen im Bereich der Pore am unteren Bildrand zu erkennen sowie das dichte, hydratisierte Zementsteingefüge, das keine charakteristischen Einzelstrukturen aufweist.

Um einen Aufschluss über die Herkunft der plattigen Strukturen zu bekommen, wurde der untere Bildbereich von Abbildung 5.35 mittels EDX-Analyse untersucht. Als charakteristische Elemente wurden Calcium und Silicium ausgewählt, da Calcium in erheblichem Umfang in Lösung geht und daher in hoher Konzentration im Porenwasser anzutreffen ist (Calciumhydroxidlösung), während Silicium primär in den Feststoffen, insbesondere im Silikastaub des anorganischen Stabilisierers und der zugegebenen Flugasche, auftritt. Der untersuchte Bildausschnitt sowie die darin ermittelte Verteilung von Calcium und Silicium sind in den Abbildungen 5.36 bis 5.38 wiedergegeben.

Es wird deutlich, dass in den Bereichen mit plattigen Strukturen hohe Calciumkonzentrationen anzutreffen sind, wohingegen die Siliziumkonzentrationen hier besonders gering sind. Somit muss davon ausgegangen werden, dass im Bereich der Porengrenzen während des gesamten Hydratationsprozesses vorwiegend Calcium anzutreffen ist. Diese Interpretation wird gestützt durch in der Literatur [112, 88] dokumentierte Untersuchungen, bei denen wiederholt von der Ausbildung plattiger Kristalle durch Calcium berichtet wird. Silicium findet sich fast ausschließlich in den Bereichen der Bruchflächen außerhalb von Poren.

Abbildung 5.39 zeigt am Beispiel einer anderen, größeren und unbeeinflussten Pore der gleichen Probe, dass sich die Calciumkristalle gleichmäßig über die gesamte sichtbare Porenoberfläche verteilen.

Somit bestätigt sich die Vorstellung, dass die Grenzfläche zwischen Luft und frischem Zementleim im Bereich der Poren als geschlossener Flüssigkeitsfilm ausgebildet ist. Bei diesem Flüssigkeitsfilm handelt es sich offensichtlich um eine Calciumhydroxidlösung, wie sie auch im Porenwasser von Zementleimen und Betonen anzutreffen ist. Bei stabilen Poren bildet sich im Zuge des Erstarrungs- und Erhärtungsprozesses eine nahezu geschlossene Oberfläche aus Calciumkristallen, was darauf hinweist, dass die Calciumhydroxidlösung einen relativ dicken und, vmtl. durch das Schaummittel, stabilen Film ausbildet. Dieser scheint von

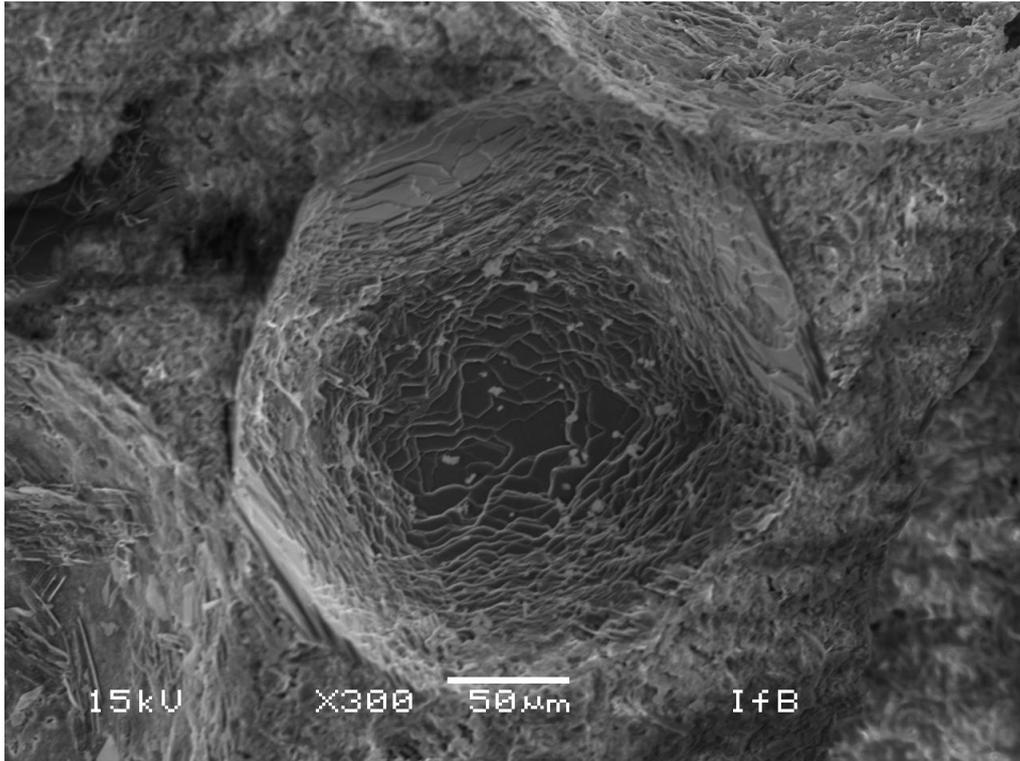


Abbildung 5.39: Flächige Auskleidung einer nicht verbundenen, kugelförmigen Pore mit Calciumhydroxidkristallen

dem Hydratationsprozess des restlichen Zementleims weitgehend unbeeinflusst zu sein.

Um einen genaueren Einblick in die Ausbildung der Porenwandungen und insbesondere den Übergangsbereich zwischen verbundenen Poren zu gewinnen, wird in den Abbildungen 5.40 und 5.41 der Kamm einer gerissenen Lamelle zwischen zwei Poren der gleichen Probe wie zuvor dargestellt. Bei 190facher Vergrößerung in Abbildung 5.40 zeigt sich erneut die schuppige Struktur der Porenwandung, wenn auch in diesem Fall nicht ganz so ausgeprägt. Sie wird teilweise überlagert von anderen Kristallformationen. Besonders auffällig sind dabei vereinzelt lange, stabförmige Strukturen, bei denen es sich der Form nach vmtl. um Ettringitkristalle handelt. Sie scheinen zu einem späteren Zeitpunkt über die Calciumhydroxidkristalle gewachsen zu sein. Eine Ursache dafür kann in der vorzeitigen Zerstörung des geschlossenen Films aus Calciumhydroxidlösung liegen. Beim Versagen der Lamelle kommt es zum Reißen dieses Films, der dadurch vollständig zerstört wird. Wie die begrenzten Löcher zwischen den Poren belegen, passiert dieses im Zustand fortgeschrittenen jedoch nicht abgeschlossenen Erstarrens. Somit ist auch die Hydratation noch nicht vollständig abgeschlossen. Daher ist es möglich, dass andere Hydratationsprodukte die zu

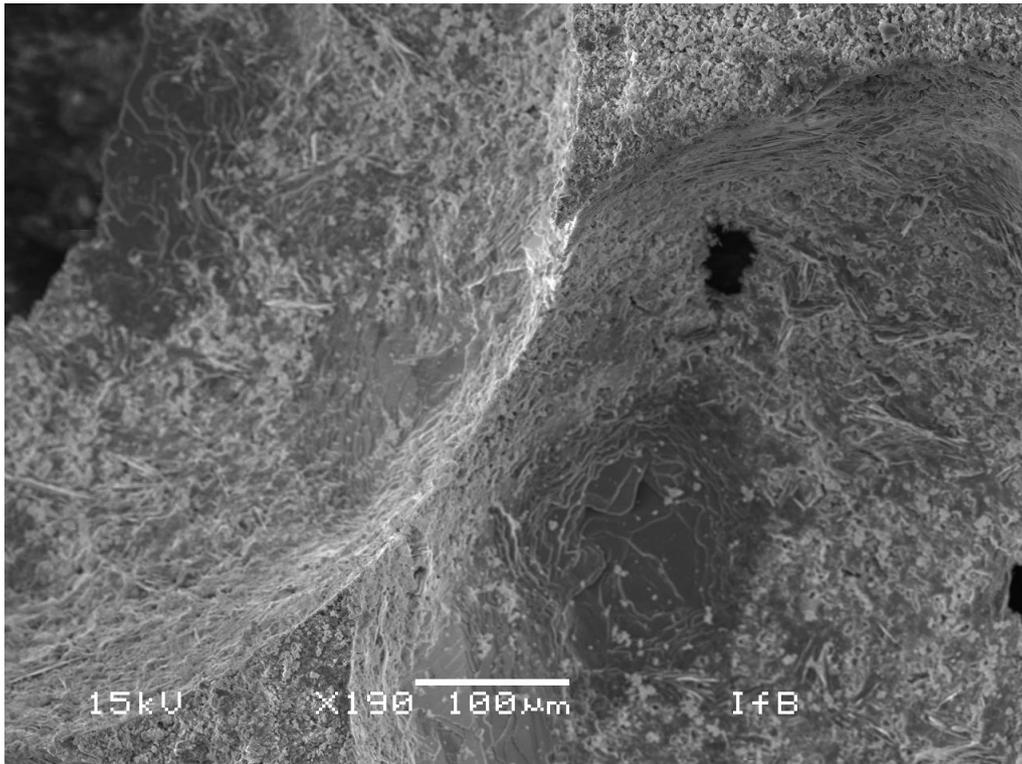


Abbildung 5.40: Aufnahme einer gerissenen Lamelle mit angrenzenden Poren bei 190facher Vergrößerung

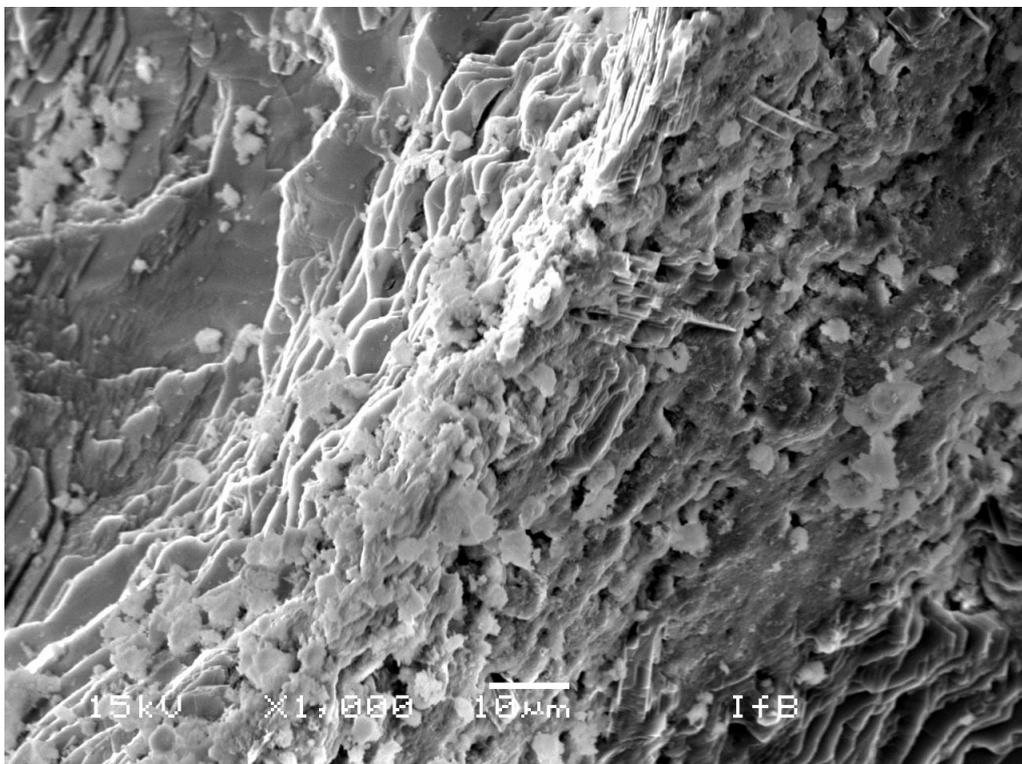


Abbildung 5.41: Detail aus Abbildung 5.40 bei 1000facher Vergrößerung

diesem Zeitpunkt noch nicht dicht ausgebildete, flächige Kristallstruktur des Calciumhydroxids durchdringen.

Abbildung 5.41 stellt das Detail der zerstörten Lamelle aus Abbildung 5.40 in 1000facher Vergrößerung dar. Auch hier ist deutlich die plattige Grundstruktur der Porenwandungen aus den Calciumhydroxidkristallen zu erkennen. Auf diesen Kristallen und insbesondere im Bereich der Versagenkante der Lamelle finden sich jedoch zusätzlich flockenartige Kristalle, bei denen es sich nach [88] um CSH-Phasen (Calcium-Silicat-Hydrat) handeln kann. Zur rechten Pore sind vereinzelt auch Ansätze von stabartigen Kristallen zu sehen, die auf Etringit hindeuten. Insgesamt wirkt der Zementstein in diesem Bereich deutlich weniger dicht und homogen als in den vollständig hydratisierten Bereichen der Bruchflächen aus Abbildung 5.35. Hier ist es also nicht zu einem gleichmäßigen Kristallwachstum gekommen, sondern zu punktuellen Kristallwucherungen vor allem auf, durch das Lamellenversagen nachträglich entstandenen Oberflächen.

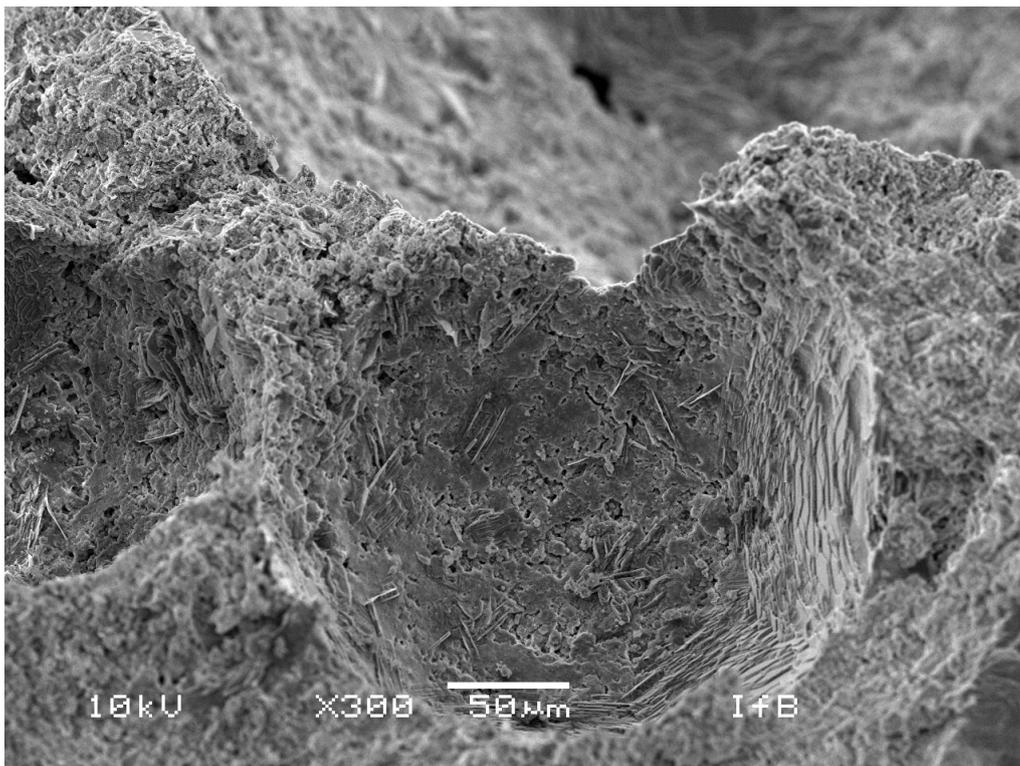


Abbildung 5.42: Dickere Calciumhydroxidkristalle als Überrest einer Ansammlung von Calciumhydroxidlösung am tiefsten Punkt einer Pore (hier durch Drehung der Probe am rechten Porenrand)

Ein weiteres Indiz für ein mögliches vorzeitiges Versagen des Films aus Calciumhydroxidlösung an der Porenwandung ist das vereinzelt beobachtete Auftreten von besonders dicken Kristallpaketen aus Calciumhydroxidkristallen in einem

Teilbereich der Porenwandung (Abbildung 5.42, rechter Porenrand). Sie erinnern an Sedimente auf dem Grund eines Sees und deuten daher auf eine vermehrte Ansammlung von Calciumhydroxidlösung in diesem Bereich der Pore hin. Diese kann entstehen, wenn nach dem Versagen des Films die bisher über die gesamte Porenoberfläche verteilte Flüssigkeitsmenge am tiefsten Punkt der Pore zusammenfließt.

5.4.4 Verwendung von Trennmitteln

Nicht explizit untersucht wurden Einflüsse aus unterschiedlichen Trennmitteln. In anfänglichen Versuchen, bei denen Prismen in geölten Stahlformen hergestellt wurden, wiesen an der Luft weitgehend stabile Schäume nach dem Einfüllen in die Prismenformen einen stark beschleunigten Zerfall auf. Durch die Verwendung von Einmalschalungen aus Polystyrolschaum ohne Trennmittel wurde dieser beschleunigte Zerfall verhindert. Es ist davon auszugehen, dass Trennmittel und insbesondere Öle wegen ihrer Grenzflächeneigenschaften und ihres Benetzungsverhaltens das sensible Kräftegleichgewicht zwischen den dünnen Schaumlamellen, den Grenzflächenspannungen und den Kapillardrücken der Blasen stören und so ein Zerreißen der Schaumlamellen und die Zerstörung des Schaums hervorrufen.

5.5 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse und Übereinstimmungen mit den Modellvorstellungen

Die durchgeführten Versuche hatten das Ziel, stoffliche Einflüsse auf die Eigenschaften von Zementschäumen zu bestimmen. Insbesondere sollten Anhaltspunkte für die Gültigkeit der in Kapitel 4 entworfenen Modellvorstellungen zur Wirkung verschiedener Ausgangsstoffe gefunden werden. Dazu wurde, basierend auf den theoretischen Überlegungen zur Rezepturgestaltung, ein aufschäumbarer Zementleim entwickelt, der relativ robust gegenüber leichten Schwankungen in seiner Zusammensetzung ist. Auf Grundlage dieser Ausgangsrezeptur konnten durch Modifikation von Ausgangsstoffen und deren Dosierungen resultierende Einflüsse auf die Zementschäume untersucht werden. Im Folgenden sind die wesentlichen Erkenntnisse aus den Versuchen in Stichpunkten zusammengefasst:

- Das direkte Aufschäumen von Zementleimen war sowohl im Zwangsmischer als auch im Schaumgenerator möglich und führte für die entwickelten Zementschaumrezepturen bei wiederholter Herstellung meist zu weitgehend reproduzierbaren Ergebnissen.
- Die Vorgaben aus den theoretischen Überlegungen zur Rezepturgestaltung, insbesondere der hohe Wassergehalt und die Verwendung organischer Zusatzmittel in hoher Dosierung, führten zu den erwarteten robusten Zementschäumen.
- Schnell reagierende Zemente ermöglichten in der Regel stabilere Schäume, da sie einerseits durch schnelles Ansteifen den Zerfallsprozess früher stoppen, andererseits durch die meist höhere Mahlfeinheit und größere Oberfläche mehr Wasser binden können. Letzteres wirkt sich allerdings negativ auf den Lufteintrag aus und führt zu etwas höheren Rohdichten.
- Zemente mit geringem Portlandzementklinkeranteil erreichten in Kombination mit den hier verwendeten hohen Dosierungen organischer Zusatzmittel kein ausreichend schnelles Ansteifen und ermöglichten daher meist keine stabilen Zementschäume.
- Für die untersuchten Betonzusatzstoffe (Flugaschen, Kalksteinmehle, Silikastaub) konnten keine grundsätzlichen Unterschiede in der Wirkung auf

die Zementschäume festgestellt werden. Es ist davon auszugehen, dass dieses Ergebnis auch auf andere Gesteinsmehle übertragbar ist. Somit sind keine schaumzerstörenden Einflüsse durch die in der Betontechnologie üblichen Zusatzstoffe zu erwarten.

- Sowohl Tensid- als auch Proteinschaumbildner erwiesen sich für das Aufschäumen von Zementleimen als geeignet. Proteinschaumbildner beeinflussten auf Grund ihrer Struktur (Makromoleküle mit hydrophilen Gruppen) die rheologischen Zementleimeigenschaften deutlich stärker. Ihre Dosierung musste sehr viel genauer auf die der Fließmittel und der (organischen) Stabilisierer abgestimmt werden. Tensidschaumbildner waren daher in der Anwendung flexibler.
- Für Tensidschaumbildner konnte tendenziell eine Abnahme der Schaumrohddichte mit steigender Schaummitteldosierung festgestellt werden. Das weist auf eine schnellere und bessere Stabilisierung der Poren hin. Bei den Proteinschaumbildnern war ein umgekehrter Effekt zu beobachten. Allerdings war der Einfluss der Dosierung auf die Rheologie der Leime sehr ausgeprägt, so dass davon ausgegangen werden muss, dass ein verringerter Lufteintrag und nicht eine schlechtere Stabilisierung der Poren die Ursache dafür war.
- Bei den durchgeführten Versuchen wirkten sich höhere Tensidschaummitteldosierungen vorwiegend auf den Lufteintrag im Zwangsmischer aus. Da hier wegen der komplexen Strömungsverhältnisse eine schnelle Stabilisierung neu entstandener Luftporen besonders wichtig ist, um ihre umgehende Zerstörung durch Scherkräfte zu verhindern, weist die verbesserte Aufschäumwirkung im Zwangsmischer deutlich auf einen schnelleren Besatz der Grenzflächen bei höherer Dosierung des Tensidschaummittels hin.
- Der Vergleich von Fließmitteln auf Polycarboxylatether- und Naphthalinsulfonatbasis zeigte beim Aufschäumen z.T. leichte Vorteile für das Naphthalinsulfonat. Eine gute Schaumstabilität wurde jedoch nur mit Polycarboxylatethern erreicht. Die Ursache dafür ist in der unterschiedlichen Wirkungsweise der Fließmittel zu suchen. Während das Naphthalinsulfonat-Fließmittel durch elektrostatische Abstoßung Partikelagglomerationen auflöst und so Zwickelwasser freisetzt, hüllen Polycarboxylatether-Fließmittel die Feststoffe durch Wasseranlagerung und sterische Effekte in einen relativ dicken Wasserfilm, wodurch Wasser gebunden wird.

- Die Fließmitteldosierung (Polycarboxylatether) hatte auf Grund der planmäßigen Überdosierung keinen wesentlichen Einfluss auf den Lufteintrag. Bei höheren Fließmitteldosierungen konnte jedoch eine feinere Porenstruktur im erhärteten Zementschaum festgestellt werden, die auf eine bessere Stabilisierung der Leimphase hindeutet.
- Der Einfluss von Entschäumern in Fließmitteln führte nur beim Aufschäumen im Mischer zu einem geringfügig verminderten Lufteintrag. Im Schaumgenerator wurden unter Verwendung von Fließmitteln mit Entschäumern sogar höhere Luftgehalte erzielt. Insgesamt sind die Effekte jedoch vernachlässigbar.
- Anorganische Stabilisierer auf Basis von feinen Silikastäuben unterstützen bei geringen Dosierungen die Stabilität des Leims und dadurch auch die Stabilität des Schaums. Bei hohen Dosierungen wurde der Lufteintrag in den Zementleim/-schaum vor allem im Schaumgenerator negativ beeinflusst, so dass sich keine zufriedenstellenden Schaumrohddichten erzielen ließen.
- Organische Stabilisierer trugen maßgeblich zur Stabilität aufgeschäumter Zementleime bei. Produktspezifisch konnten jeweils Grenzdosierungen ermittelt werden, unterhalb derer die hergestellten Schäume zerfielen und oberhalb derer sie stabil waren. Diese Grenzdosierung korrelierte mit der Molekülgröße bzw. dem Polymerisationsgrad. Je höher der Polymerisationsgrad, desto geringer war die für die Schaumstabilität erforderliche Dosierung. Oberhalb der jeweiligen Grenzdosierung wurden keine wesentlichen Unterschiede im Lufteintrag oder der Stabilität der Schäume festgestellt. Bei hohen Dosierungen war die Verarbeitbarkeit, insbesondere im Schaumgenerator, nur noch eingeschränkt möglich, was zur Abnahme der erreichbaren Luftgehalte führte. Die verwendeten organischen Stabilisierer wiesen jedoch einen relativ breiten Dosierbereich auf, in dem sie nahezu unveränderte, gleichmäßig gute Ergebnisse ermöglichten.
- Die Herstellung stabiler Zementschäume war auf Luftgehalte von maximal ca. 65 Vol.-% im frischen Zustand begrenzt, was zu einer Frischrohddichte von ca. 0,60 - 0,65 g/cm^3 führte. Durch Austrocknung verringerte sich die Rohddichte während der Erhärtung nochmals um ca. 0,10 - 0,15 g/cm^3 . In Ausnahmefällen konnten noch geringere Festrohddichten bis ca. 0,40 g/cm^3 erreicht werden; entsprechende Prismen wiesen jedoch keine technisch nutzbaren Festigkeiten auf.

- Druck- und Biegezugfestigkeiten der Zementschäume zeigten zwar erhebliche Schwankungen, standen jedoch tendenziell in einem linearen Zusammenhang zur Rohdichte der Schäume. Sowohl die mittlere als auch die maximal erreichbare Druckfestigkeit der Schäume war von der verwendeten Zementfestigkeitsklasse abhängig.
- Im frischen Zementschaum kam es an den Porengrenzflächen zur Ausbildung stabiler Flüssigkeitsfilme aus Calciumhydroxidlösung, die bis zum Ansteifen zur Stabilisierung der Poren beigetragen haben.
- Ein zuverlässiges Verfahren zur Analyse der Porenstruktur aufgeschäumter Zementleime fehlt bislang. Um aussagekräftige Daten zu erhalten, sind sowohl die Größe als auch die Form der Poren zu ermitteln. Dieses setzt ein mindestens zweidimensionales Analyseverfahren voraus.
- Der Kontakt zu Trennmitteln, vor allem Ölen, führte oftmals zum Zerfall des Zementschaums. Offensichtlich ergab sich ein erheblicher Eingriff in das Gleichgewicht der Oberflächenspannungen, dass sich während der Zementschaumherstellung ausbildet.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse konnten wesentliche Elemente der in Kapitel 4 entwickelten Modellvorstellung zur Wirkungsweise einzelner Stoffgruppen und zur Herstellung aufgeschäumter Zementleime bestätigt werden. Nachfolgend wird auf einzelne Punkte der Modellvorstellung eingegangen und kurz erläutert wodurch sie bestätigt wurden.

- Um die Blasengrenzflächen zu stabilisieren, sind diese als Flüssigkeitsfilm auszubilden, der die Zwickel des Feststoffgerüsts vollständig ausfüllt und zu einer glatten Porenoberfläche führt. Dazu sind relativ hohe Wassergehalte notwendig.

Die rasterelektronenmikroskopischen Bilder in Verbindung mit der EDX-Analyse weisen eindeutig Calciumhydroxid als vorherrschendes Kristall im Bereich der Porenoberflächen aus. Calciumhydroxid tritt im frischen Zementleim primär als flüssige Calciumhydroxidlösung auf, so dass von einem ausgeprägten Flüssigkeitsfilm aus Calciumhydroxidlösung im Bereich der Porenwandungen ausgegangen werden kann. Die beobachtete Gleichmäßigkeit und Ebenheit der Kristallstruktur insbesondere bei geschlossenen Poren zeigt, dass keine Durchdringung des Flüssigkeitsfilms durch Feststoffe auftrat.

- Hohe Schaummittelkonzentrationen verbessern die Stabilisierung der Poren im Herstellungsprozess.

Die Vorteile höherer Tensidschaummittelkonzentrationen hinsichtlich des Lufteintrags speziell im Zwangsmischer zeigen, dass durch ausreichend hohe Schaummitteldosierungen eine schnelle und optimale Stabilisierung neu eingetragener Poren erfolgen kann.

- Schnell reagierende, feine Zemente wirken sich günstig auf die Stabilität des Zementschaums aus.

Der Vergleich der verschiedenen CEM I-Zemente hinsichtlich der Porenstruktur im erhärteten Zementschaum belegt eindeutig den weiter fortgeschrittenen Schaumzerfall bei den gröbereren Zementen. Als Ursache ist zum einen die geringere Oberfläche und das damit korrelierende geringere Wasserbindungsvermögen zu sehen, wodurch eine Drainage begünstigt wird, zum anderen das langsamere Ansteifen, das entsprechend spät den Zerfallsprozess stoppt.

- Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatethern wirken durch die Ausbildung stabiler Flüssigkeitsfilme um die Feststoffe stabilisierend auf Leim und Zementschaum.

Der Vergleich der Fließmittel auf Basis von Polynaphtalinsulfonaten und Polycarboxylatethern (PCE) zeigt, dass, bei vergleichbarer Verflüssigung der Leime und ähnlichen Luftgehalten der Schäume, Schäume mit PCE eine deutlich höhere Stabilität aufweisen. Gleichzeitig ist die Aufschäumwirkung im Zwangsmischer, die wesentlich vom (freien) Wassergehalt abhängt, für Schäume mit PCE etwas geringer. Beide Effekte deuten darauf hin, dass es durch die PCE zur Ausbildung von Wasserfilmen um die Feststoffe kommt, die einerseits die innere Reibung verringern (Verflüssigung durch sterische Hinderung) und andererseits die Beweglichkeit der Wassermoleküle durch Bindung an die Feststoffe reduzieren und somit Drainageerscheinungen verringern.

- Anorganische Stabilisierer wirken sich bei mäßiger Dosierung durch Glättung der Feststoffoberfläche im Bereich der Porenwandungen positiv auf die Schaumstabilität aus.

Die Verwendung des anorganischen Stabilisierers ist mit erheblichen Einflüssen auf die rheologischen Eigenschaften des Zementleims verbunden. Daher kann eine stabilisierende Wirkung auf den Schaum nicht eindeutig

auf Effekte im Bereich der Porenwandungen zurückgeführt werden, sondern kann auch in der allgemein größeren Zähigkeit des Leims begründet sein. Auch die rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen brachten hierzu keine Erkenntnisse. Es kann also ein positiver Effekt durch den anorganischen Stabilisierer festgestellt werden, ein eindeutiger Aufschluss über die Wirkungsweise konnte jedoch nicht gewonnen werden.

- Organische Stabilisierer verringern die Drainage, indem sie Wassermoleküle binden und durch Ausbildung von Molekülagglomeraten und Netzstrukturen die Mobilität der Wassermoleküle reduzieren.

Die Versuchsergebnisse zeigen deutlich, dass die Wirksamkeit der organischen Stabilisierer nicht proportional zur Dosierung zunimmt, sondern dass sich in Abhängigkeit vom Grad ihrer Polymerisation, also der Molekülgröße und der Ausbildung der Nebenkette, eine Grenzdosierung ergibt, ab der Zementschäume stabil sind. Dabei weisen größere Moleküle eine niedrigere Grenzdosierung auf als kleinere Moleküle. Dieser Effekt ist einerseits auf die vermehrte Wasseranlagerung durch mehr hydrophile Gruppen zurückzuführen. Diese Bildung von Molekülagglomeraten aus Wasser- und Stabilisierermolekülen nimmt allerdings proportional zur Stabilisiererdosierung zu, so dass der sprunghafte Stabilitätszuwachs eine andere Ursache haben muss. Dafür kommt vor allem die Ausbildung von Netzstrukturen in Frage, die bei ausreichender Moleküldichte durch Interaktionen zwischen den Molekülen („Verknotungen“) entstehen könnten. Ein direkter Nachweis für diese Wirkungsweise auf molekularer Ebene war allerdings nicht möglich.

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass die entwickelte Modellvorstellung zu zementgebundenen Schäumen in den wesentlichen Punkten das reale Verhalten der Schäume und ihrer Ausgangsstoffe gut widerspiegelt. Auch die Überlegungen zur Rezepturentwicklung haben sich als zielführend erwiesen und ermöglichen die Herstellung stabiler zementgebundener Schäume.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit bestand darin, aus der Verknüpfung von naturwissenschaftlichen Grundlagen zur Herstellung und Stabilität von Schäumen und dem betontechnologischen Wissen über Zementleime Entwicklungsstrategien zur systematischen Herstellung von stabilen, zementgebundenen Schäumen abzuleiten. Darüber hinaus sollten diese Entwicklungsstrategien experimentell verifiziert werden, um zukünftig als Basis für die Weiterentwicklung von leichten, zementgebundenen Baustoffen zu dienen.

Im Mittelpunkt der Überlegungen und Untersuchungen stehen Bedingungen und Grenzen für einen physikalischen Lufteintrag in Zementleime. Die Luft in Form von Blasen bzw. Poren wird als separate Komponente von aufgeschäumten Zementleimen betrachtet. Im Gegensatz zu anderen Baustoffkomponenten ergibt sich der Einfluss der Luft auf den Zementschaum nicht aus den Eigenschaften der Luft, sondern aus der Zusammensetzung und den Eigenschaften des Zementleims in Verbindung mit dem Herstellungsprozess der Schäume.

Zunächst wurden schaumtechnologische Grundlagen aus unterschiedlichen naturwissenschaftlichen und technischen Bereichen, wie z.B. der Oberflächenphysik, der Verfahrenstechnik oder der Lebensmitteltechnik, zusammengetragen. Besondere Schwerpunkte lagen dabei auf der Herstellung und der Stabilität von Schäumen sowie den Einflüssen der flüssigen Phase. Weiterhin wurden Einflüsse verschiedener Rezepturparameter und Ausgangsstoffe auf die Eigenschaften von Zementleimen dargestellt. Berücksichtigung fanden dabei vor allem Auswirkungen auf das rheologische Verhalten, die Mischungsstabilität und den Erstarrungsprozess, da diese die Grundlage für die gezielte Optimierung von Zementleimen als flüssige Phase eines Schaums darstellen.

Ausgehend von den Grundlagen der Schaumtechnologie (Kapitel 2), den betontechnologischen Möglichkeiten zur Steuerung von Zementleimeigenschaften

(Kapitel 3) und Vorversuchen wurde in Kapitel 4 eine Modellvorstellung für stabile Zementschäume entwickelt. Diese umfasst die Phasen der Herstellung, der Verarbeitung sowie des Ansteifens, Erstarrens und Erhärtens der Zementschäume. Dabei wurde auf das komplexe Zusammenspiel der verschiedenen Leimkomponenten und deren positiven oder negativen Einflüssen in den unterschiedlichen Phasen detailliert eingegangen. Aus der Modellvorstellung konnten Strategien für eine Rezepturentwicklung aufschäumbarer Zementleime abgeleitet werden.

Abschließend wurde aus den theoretischen Erwägungen eine stabile Zementschaumrezeptur abgeleitet, anhand derer durch Modifikation einzelner Ausgangsstoffe (Zementart, Zusatzstoff, Schaummittel, Fließmittel, Stabilisierer) und ihrer Dosierungen viele der theoretisch hergeleiteten Zusammenhänge und Einflüsse experimentell überprüft und bestätigt werden konnten.

Einige zentrale Erkenntnisse dieser Arbeit sind in den nachfolgenden Stichpunkten wiedergegeben:

- Herstellung und Verarbeitung von physikalisch aufgeschäumten Zementleimen erlauben nur die stabile Form der Kugelschäume. Eine optimale Porengrößenverteilung vorausgesetzt, sind die theoretisch erreichbaren Luftgehalte daher auf etwas über 80 Vol.-% begrenzt. In der praktischen Anwendung können nur ca. 65 Vol.-% Luft im frischen Zementleim stabil erreicht werden (Rohdichte ca. 0,6 - 0,65 g/cm³), da die Porengrößenverteilung sowie die Lage der Poren im Raum zufällig und nicht geometrisch optimiert ist. Durch Hydratation und Austrocknung werden für erhärtete Zementschäume etwas höhere Porositäts- und geringere Rohdichtewerte erreicht.
- Die Ausbildung stabiler Poren und somit das Aufschäumen erfordert einen ausreichenden Wassergehalt, der glatte Porenwände und eine gleichmäßige Verteilung grenzflächenaktiver Stoffe über die Grenzflächen Luft/Leim zulässt.
- Die Schaumstabilität ist primär davon abhängig, ob es gelingt, Entmischungen und eine Drainage von Wasser oder Wasser-Feinststoff-Gemischen zu verhindern. Da herkömmliche Zementleime bei den für das Aufschäumen erforderlichen w/z-Werten zu Entmischungen neigen, ist eine zuverlässige Stabilisierung der Leime erforderlich. Diese konnte durch die Zugabe organischer Zusatzmittel erreicht werden. Dabei haben sowohl die Eigenschaften und Wirkungsweisen von Fließmitteln als auch die von

organischen Stabilisierern eine wesentliche Bedeutung. Als Fließmittel eignen sich besonders solche auf Basis von Polycarboxylatethern, die durch ihre Struktur stabile, relativ dicke Wasserfilme um die Feststoffpartikel ermöglichen. Organische Stabilisierer binden Wassermoleküle in den Kornzwischenräumen und bilden so vernetzte Molekülagglomerate aus, die eine geringe Mobilität aufweisen. Dabei ist die Größe der Stabilisierermoleküle von entscheidender Bedeutung für ihre Wirksamkeit.

- Bei der Wahl des Bindemittels ist auf eine ausreichend schnelle Hydratation zu achten, da der Zerfallsprozess des Schaums zwar durch geeignete Rezepturen verlangsamt werden kann, jedoch nur durch das Erstarren des Leims vollständig gestoppt wird. Ein schnelleres Erstarren wirkt sich somit positiv auf die Porenstruktur der Zementschäume aus. Dabei ist zu beachten, dass die Zugabe von (organischen) Zusatzmitteln in der erforderlichen hohen Dosierung verzögernd wirkt und das Bindemittel dennoch ein zügiges Erstarren ermöglichen muss.
- Sowohl Tensid- als auch Proteinschaummittel sind zur Stabilisierung der eingebrachten Luft geeignet. Da es sich bei Proteinschaumbildnern und organischen Stabilisierern jeweils um Makromoleküle mit hydrophilen Gruppen handelt, ergeben sich z.T. ähnliche rheologische Einflüsse auf den Leim, vor allem aber auch verzögernde Wirkungen. Daher sind bei Verwendung von Proteinschaummitteln die Dosierungen der (organischen) Zusatzstoffe stärker aufeinander abzustimmen. Die Nebenwirkungen der Tenside auf die Leimeigenschaften sind weniger ausgeprägt, weshalb sie einfacher mit anderen Zusatzmitteln kombiniert werden können.
- Die Untersuchung verschiedener Zusatzstoffe ergab keine wesentlichen Unterschiede im Aufschäumverhalten und der Stabilität der Leime. Es ist davon auszugehen, dass alle üblichen Betonzusatzstoffe auch für aufgeschäumte Zementleime geeignet sind.

Somit können die Entwicklungsstrategien für aufgeschäumte Zementleime wie folgt zusammengefasst werden:

- Einstellen relativ hoher Wassergehalte, um die Ausbildung von stabilen, glatten Flüssigkeitsfilmen an den Porenwandungen zu ermöglichen

- Einsatz hoher Schaummittelkonzentrationen, bevorzugt auf Tensidbasis, um eine schnelle Stabilisierung der Flüssigkeitsfilme an den Porenwandungen sicherzustellen
- Verwendung von Fließmitteln auf Basis von Polycarboxylatethern, um eine Bindung des Wassers an die Feststoffe zu erreichen
- Einsatz von organischen Stabilisierern, um freies Wasser in den Kornzwischenräumen zu binden
- Zugabe von Silikastäuben bzw. anorganischen Stabilisierern, um das Kornband zu ergänzen und Zwickelgrößen zu verringern
- Bei der Feststoffzusammensetzung (Zement und Zusatzstoffe) ist auf einen hinreichend hohen Portlandzementklinkeranteil zu achten, um ein zügiges Ansteifen sicherzustellen
- Die Feststoffe müssen ausreichend fein sein, um eine große Oberfläche zur Wasseranlagerung bereitzustellen

Auf Grundlage dieser Strategien zur Rezepturenentwicklung können Zementschäume hergestellt werden, die eine gute Robustheit gegenüber herstellungsbedingten Schwankungen in der Zusammensetzung aufweisen.

6.2 Ausblick

Die vorliegende Arbeit soll wesentlich zum Verständnis der Zusammenhänge rund um das Einbringen von Luft in Zementleime beitragen. Es ist zu hoffen, dass sie einen deutlichen Schritt in Richtung einer breiteren technischen Nutzung geschäumter, zementgebundener Baustoffe ermöglicht. Dabei kann es sich um aufgeschäumte Zementleime handeln, wie sie in dieser Arbeit im Labormaßstab untersucht wurden. Die Ergebnisse können jedoch auch als Grundlage für die Weiterentwicklung von Leichtzuschlagschaumbetonen dienen, die, z.B. in Verbindung mit Blähglas als extrem leichtem Zuschlagstoff, definierte Festigkeitseigenschaften bei nochmals deutlich geringeren Rohdichten ermöglichen. Weiterhin ist eine Übertragung auf andere mineralische, erhärtende Schäume möglich.

Sowohl die Weiterentwicklung der aufgeschäumten Zementleime als auch die der Leichtzuschlagschaumbetone zu praxistauglichen Baustoffen erfordert zusätzlichen Forschungsaufwand im Bereich der Herstellverfahren und zur vollständigen Beschreibung der Eigenschaftsprofile.

In Bezug auf die Herstellung ist vor allem eine Verbesserung der Schaumgeneratortechnik erforderlich. Dabei sollten drei Aspekte im Mittelpunkt stehen:

- Optimierung des Lufteintrags insbesondere hinsichtlich der Gleichmäßigkeit
- Skalierung des Systems auf praxisgerechte Herstellungskapazitäten
- Umstellung von Chargenbeschickung des Schaumgenerators auf kontinuierliche Beschickung

Zur Herstellung von Leichtzuschlagschaumbetonen sind darüber hinaus schonende und zuverlässige Verfahren zur homogenen Verteilung der Zuschlagstoffe im Leim zu erproben, die möglichst geringe Einflüsse auf die Porenstruktur haben.

An den Baustoffen selbst sind je nach angestrebter Verwendung ebenfalls weitergehende Untersuchungen und Optimierungen erforderlich, z.B. hinsichtlich

- der Einflüsse aus Herstellungsbedingungen (Klima, Verarbeitungsdauer)
- des Kriech- und Schwindverhaltens
- der Dauerhaftigkeit (z.B. Einflüsse der Carbonatisierung auf die Festigkeit, Frost)
- der Homogenität bei der Herstellung großer Bauteile
- mechanischer Eigenschaften (Festigkeit, E-Modul, ggf. plastische Verformung)
- bauphysikalischer Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, Feuchteaufnahme)

Um eine aussagekräftige Untersuchung der Porenstruktur von geschäumten Zementleimen oder Schaumbetonen zu ermöglichen, ist die Entwicklung von mindestens zweidimensionalen Verfahren zur Detektion von Porengrößen und -formen erforderlich. Hier ist insbesondere das Auftreten von Porensystemen

aus untereinander verbundenen Kugelporen zu erfassen und in die statistische Aufbereitung der gewonnenen Daten einzubeziehen.

Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse zu Wirkungen und Wirkungsweisen der betrachteten Ausgangsstoffe, insbesondere der Fließmittel, Stabilisierer und Tenside, lassen sich auch auf andere (Hochleistungs-)Beton übertragen. So können die dargestellten Mechanismen zur Stabilisierung sehr fließfähiger Zementleime auch bei der Herstellung von Selbstverdichtenden Betonen oder Sichtbetonen von Interesse sein. Eine Anwendung der Erkenntnisse zum Lufteintrag und zur Stabilisierung von Luftblasen für die Optimierung von Luftporenbetonen im Hoch- und Straßenbau ist nahe liegend. Der Umkehrschluss kann jedoch auch Wege zu einem minimierten Lufteintrag aufzeigen, wie er bei der Herstellung von Hochfesten und Ultrahochfesten Betonen von großer Bedeutung ist.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Übersicht über den Aufbau der Arbeit	5
2.1	Charakterisierung einer Flüssigkeit/Gas-Dispersion	8
2.2	Darstellung einer Plateaugrenze, aus [64]	9
2.3	Modell einer Grenzfläche, nach [45, 32]	11
2.4	Schematischer Aufbau eines einfachen Tensids (Seife), nach [8] .	13
2.5	Wirkungsweise von Tensiden, nach [32]	14
2.6	Räumliche Mizellstrukturen, nach [56]	16
2.7	Anordnung eines globulären Proteinmoleküls, nach [10]	17
2.8	Adsorptionsmechanismen von Proteinen und Tensiden, nach [116]	18
2.9	Abstoßungsdruck durch hydrophile (-) Moleküle, nach [127]	24
2.10	Kräftegleichgewicht in Blasenwänden	25
2.11	Marangoni-Stabilisierung bei Schaumlamellen, nach [104]	26
2.12	Gibbs-Stabilisierung bei Schaumlamellen, nach [104]	27
2.13	Schaumstabilisierung durch organische Verbindungen, nach [65]	28
2.14	Schaumstabilisierung durch Elektrolyte, nach [65]	29
2.15	Schaumstabilisierung durch Polymere, nach [65]	30
2.16	Unterschiedlich benetzte Partikel auf einer Flüssigkeitsoberflä- che, nach [127]	31
2.17	Blasenannäherung mit Feststoffpartikeln, nach [127]	31
2.18	Benetzungsverhalten fester Partikel, nach [127]	32
2.19	Koaleszenzbehinderung durch Feststoffpartikel, nach [12]	32
2.20	Stabilisierung einer Luftblase durch feste Partikel, nach [10] . .	33
2.21	Prinzipskizze Dispergieren von Gas in Flüssigkeit, nach [4] . . .	35
2.22	Skizze zweier Segmente eines Kenics-Mischers, nach [128]	36
2.23	Begasungsmöglichkeiten, nach [122]	37
2.24	Prinzipskizze Membranaufschäumen, nach [4]	41
2.25	Wirkende Kräfte bei der Blasenbildung, nach [4]	41
2.26	Einfluss des Gasvolumenstroms auf das Blasenbild, nach [41] . .	44

2.27	Entspannen einer mit Gas übersättigten Flüssigkeit, nach [49]	45
2.28	Bläschenkoaleszenz durch Kollision im Scherfeld, aus [119]	46
2.29	Viskositäts- und Strukturverhalten mehrphasiger Stoffsysteme, nach [119]	47
3.1	Scherwiderstand von Kornhaufwerken bzw. Suspensionen, nach [99]	50
3.2	Kräfte zwischen zwei kolloidalen Partikeln, nach [9]	52
3.3	Kapillarkohäsion zwischen zwei Partikeln, aus [37]	53
3.4	Agglomeration von Zemetpartikeln, aus [13]	55
3.5	Agglomeration von Quarzpartikeln, aus [102]	58
3.6	Abbau von Quarzagglomerationen durch verflüssigende Zusatzmittel, aus [102]	58
3.7	Füllerwirkung und Wasserrückhaltevermögen von Silikastäuben, nach [87]	59
3.8	Beispiele für Strukturelemente von Sulfonaten, aus [13]	62
3.9	Schematischer Aufbau von Polycarboxylaten, aus [13]	63
3.10	Polycarboxylatethern auf Basis von Acryl- und Methacrylsäure, aus [13]	64
3.11	Elektrosterische Dispersion von Zementpartikeln, aus [106]	66
3.12	Elektrochemischen Doppelschicht an der Oberfläche von Zementpartikeln, aus [13]	66
3.13	Strukturdarstellung zweier Grundstoffe für organische Stabilisierer, aus [21]	73
3.14	Verdickungseffekt verschiedener Stärkeether, aus [40]	74
3.15	Gefügeentwicklung bei der Hydratation des Zements, nach [90]	76
3.16	Prinzipskizze zu Verdunstung und Wasserentzug durch saugende Materialien	78
4.1	Zusammenhang zwischen Porenstruktur, Luftgehalt und Rohdichte	83
4.2	Schaum mit körniger Struktur	85
4.3	Modellrechnung zur maximalen Porosität von Zementleimen	87
4.4	Sich überschneidende Kugelporen in erhärtendem Zementleim	88
4.5	Kugelschaum mit ca. 55 Vol.-% Luft	89
4.6	Fließvorgang in eine Form ohne und mit Lufteinschluss	92
4.7	Blasenoberfläche bei geringen (links) und höheren (rechts) Wassergehalten	94

4.8	Schema der Verteilung grenzflächenaktiver Stoffe bei unregelmäßiger Oberfläche	95
4.9	Widerstand bei Molekülbewegung	96
4.10	Molekülbeeinflussung durch Oberflächenladungen	97
4.11	Ansicht eines geöffneten Mischers, Herstellerbild Fa. Zyklus	99
4.12	Mischprinzip der Eirich-Intensivmischer, aus Produktinformationen der Fa. Eirich	100
4.13	Glättung einer Blasenwand durch Silikastäube	104
4.14	Netzstrukturen in flüssiger Phase durch Organische Stabilisierer	105
4.15	Ausbildung von Scherflächen bei unterschiedlichen Korngrößenverteilungen	107
4.16	Aufsteigen einzelner Blasen	110
4.17	Annäherung und Koaleszenz zweier Blasen durch Auftriebskraft	111
4.18	Auswirkungen der Drainage auf den Zementschaum	112
4.19	Reduzierte Drainage durch Wasseranlagerung	115
4.20	Reduzierte Drainage durch org. Stabilisierer	116
4.21	Ausbildung der Blasengrenzflächen mit Protein- und Tensidschaumbildnern	117
4.22	Prisma mit ausgeprägtem horizontalen Schichtaufbau	119
4.23	Ostwaldreifung bei protein- und tensidstabilisierten Blasen	121
4.24	Einfluss von Portlandzementklinkeranteil auf Verlauf des Ansteifens	122
4.25	Einfluss der Mahlfeinheit des Zements auf das Ansteifen und Erstarren	123
4.26	Schnitt durch einen Zementschaum mit sich überschneidenden Kugelporen	125
4.27	Schaumprisma nach weitgehendem Entlüften	126
4.28	Schaumprisma mit ausgedehntem Hohlraum	127
4.29	Extremer Fall sich überschneidender Kugelblasen	131
4.30	Bruchfläche eines inhomogenen Zementschaumprismas	132
4.31	Zementschaumprisma mit drainagebedingter Schichtung	133
4.32	Schwindriss in einer Zementschaumlamelle	134
4.33	Ausgeprägter Schwindriss an der Oberfläche eines erhärteten Zementschaumprismas	135
4.34	Modellvorstellung für Zementschäume	137
5.1	Intensivmischer, Quelle Fa. Eirich, verändert	147
5.2	Mischwerkzeug des Intensivmischers	148

5.3	Prinzipskizze des Schaumgenerators (nicht maßstäblich)	150
5.4	Schnitt durch die Reaktorstrecke des Schaumgenerators	151
5.5	Fehlfunktionen des Schaumgenerators	152
5.6	Gegenüberstellung von Wassergehalt und Rohdichte	157
5.7	Kornbänder der verwendeten Zemente	160
5.8	Einflüsse der Zementarten	161
5.9	Einflüsse der Zementarten	162
5.10	Einfluss der Füllerart auf die Rohdichten bei grobem Zement . .	165
5.11	Einfluss der Füllerart auf die Rohdichten bei feinem Zement . .	165
5.12	Vergleich unterschiedlicher Tensidschaumbildner	166
5.13	Einfluss der Schaummitteldosierung auf die Rohdichte	168
5.14	Einfluss der Schaummitteldosierung auf die Rohdichte	168
5.15	Einfluss der Schaummitteldosierung auf die Porengrößenverteilung	171
5.16	Einfluss der Fließmitteldosierung auf Ausbreitfließmaß und Roh- dichte	172
5.17	Einfluss der Fließmitteldosierung und Ausbreitfließmaß und Roh- dichte	174
5.18	Einfluss des Fließmittelentschäumers auf die Rohdichte	175
5.19	Einfluss der Fließmitteldosierung auf die Porengrößenverteilung	176
5.20	Einfluss der Dosierung eines anorganischen Stabilisierers auf Aus- breitfließmaß und Rohdichte	178
5.21	Korrelation zwischen Dosierung organischer Stabilisierer und Ausbreitfließmaß	180
5.22	Korrelation zwischen Dosierung organischer Stabilisierer und Rohdichte	180
5.23	Einfluss organischer Stabilisierer	182
5.24	Korrelation zwischen der Rohdichte und Druck- bzw. Biegezug- festigkeit	183
5.25	Festigkeitsschwankungen innerhalb einer Mischung	184
5.26	Zementeinfluss auf die Druckfestigkeiten	186
5.27	Zementeinfluss auf die Biegezugfestigkeiten	186
5.28	Zementeinfluss auf die Druckfestigkeiten	187
5.29	Porenschnittlängen	189
5.30	Messlinien zur Untersuchung der Porenstruktur	190
5.31	Vergleich der ermittelten Luftgehalte	191
5.32	Fehlerhafte Interpretation verbundener Poren	193
5.33	REM-Aufnahme der Bruchfläche eines Zementschaums	197

5.34	REM-Aufnahme der Bruchfläche eines Zementschaums	198
5.35	REM-Aufnahme der Bruchfläche eines Zementschaums	198
5.36	Bildausschnitt für EDX-Analyse	199
5.37	Ca-Verteilung	199
5.38	Si-Verteilung	199
5.39	REM-Aufnahme einer flächig mit Calciumhydroxidkristallen ausgekleideten Pore	201
5.40	REM-Aufnahme einer gerissenen Lamelle	202
5.41	REM-Aufnahme einer gerissenen Lamelle	202
5.42	REM-Aufnahme einer Calciumhydroxidansammlung in einer Pore	203

Tabellenverzeichnis

2.1	Grenzflächeneigenschaften von Proteinen und Tensiden, nach [79]	19
3.1	Strukturmerkmale und Eigenschaften von Polycarboxylaten, nach [48]	65
4.1	Rohdichtevergleich unterschiedlicher fiktiver Zementleime	82
4.2	Übersicht über die Einflüsse und Wirkungsweisen verschiedener Rezepturparameter auf Schaumherstellung und Schaumstabilität	140
5.1	Ergebnisse der Vorversuche zu den Mischeinflüssen (negative Vorzeichen weisen auf gegenläufige Drehrichtung hin)	149
5.2	Eckdaten der verwendeten Grundrezeptur für die aufgeschäumten Zementleime	154
5.3	Vergleich der CEM I-Zemente	160
5.4	Vergleich der organischen Stabilisierer	179

Literaturverzeichnis

- [1] Aitcin, P.-C.; Jolicoeur, C.; MacGregor, J. G.: Superplasticizers: How They Work and Why They Occasionally Don't. Concrete International, V. 16, No. 5, S. 45-52, 1994
- [2] Albrecht, W.; Mannherz, U.: Zusatzmittel, Anstrichstoffe, Hilfsstoffe für Beton und Mörtel. Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1968
- [3] Andersen, P.J.; Roy, D.M.; Gaidis, J.M.: The Effect of Superplasticizer Molecular Weight in Its Adsorption On, and Dispersion Of, Cement. Cement and Concrete Research, Vol. 18, No. 6, S. 980-986, 1988
- [4] Bals, A.: Verfahrenstechnik und Substratfaktoren beim Aufschäumen mit Membranen. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 14 - Landtechnik/Lebensmitteltechnik, VDI Verlag, Düsseldorf, 2002
- [5] Banfill, P. F. G.: The Rheology of fresh Cement and Concrete -A Review. 11 th International Cement Chemistry Congress, Durban, May 2003
- [6] Barnes, H. A.; Hutton, J. F. ; Walters, K.: An Introduction to Rheology. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1989
- [7] Beck, C.: Modellierung und quantitative Analyse der Luftporenverteilung in frost-tausalzbeständigem Festbeton mittels digitaler Bildverarbeitung. Dissertation, Universität Bremen, 2002
- [8] Benedix, R.: Chemie für Bauingenieure. B. G. Teubner Verlag Stuttgart, 1999
- [9] vom Berg, W.: Zum Fließverhalten von Zementsuspensionen. Dissertation RWTH Aachen, Aachen, 1982

- [10] Besner, H.: Grenzflächenwechselwirkungen und Mechanismen der Schaumstabilisierung beim Aufschäumen von Sahne. Dissertation. Fakultät für Brauwesen, Lebensmitteltechnologie und Milchwissenschaft der TU München, 1997
- [11] Kind-Barkauskas, F.; Kauhsen, B.; Polonyi, S.; Brandt, J.; Bundesverband der deutschen Zementindustrie (Hrsg.): Beton Atlas. Verlag Bau+Technik Düsseldorf, 2001
- [12] Bikerman, J.J.: Foams. Springer-Verlag, New York, 1973
- [13] Blask, O.: Zur Rheologie von polymermodifizierten Bindemittelleimen und Mörtelsystemen. Dissertation UGH Siegen, Siegen, 2002
- [14] Bombled, J. P.: Rheologie des Mortiers et des Betons Frais, Influence du Facteur Ciment. RILEM Seminar Fresh Concrete, Leeds, 1973
- [15] Bonzel, J.; Siebel, E.: Bestimmung von Luftporenkennwerten am Festbeton. beton, Heft 12, S. 459-466, 1981
- [16] Brameshuber, W.; Pierkes, R.: Einfluß von Stabilisatoren auf die Porenstruktur und die Dauerhaftigkeit von Beton. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2003
- [17] Brauer, H.: Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen. Verlag Sauerländer, Aarau, 1971
- [18] Bruere, G. M.: The Relative Importance of Various Physical and Chemical Factors on Bubble Characteristics in Cement Pastes. Australian Journal of Applied Science, Heft 12, S. 78-86, 1961
- [19] Bundesverband Porenbeton (Hrsg.): Porenbeton Handbuch. 5. Auflage, Bauverlag, Wiesbaden, 2002
- [20] Camp, M.; Durham, K.: The Foaming of Sodium Laurate Solutions - Factors influencing Foam Stability. The Journal of Physical Chemistry, 59, S. 993-998, 1955
- [21] Chaplin, M.: Water Structure and Behavior. <http://www.lsbu.ac.uk/water/index.html>, 16.01.2006
- [22] Chiochio, G.; Paolini, A. E.: Optimum Time for adding Superplasticizers to Portland Cement Pastes. Cement and Concrete Research, 15, S. 901-908, 1985

- [23] Civiltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving; Stichting Schuimbeton Nederland: Werken met schuimbeton - Eigenschaften en toepassingen. Civiltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, Rapport 181, 1995
- [24] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Prüfung von Beton, Empfehlugen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 422, 1991
- [25] Derjaguin, B. V.; Landau, L. D.: Theory of Stability of Strongly Charged Lyophobic Sols and Adhesion of Strongly Charged Particles in Solutions of Electrolytes. Acta Physicochimica 14, S. 633-662, UdSSR, 1941
- [26] Deutsche Bauchemie e.V.: Herstellen von Luftporenbeton - Informationsschrift. Juni 2001
- [27] Dickinson, E.; Stainsby, G. (Hrsgb.): Advances in Food Emulsions and Foams, Elsevier Science Publishing, New York, 1989
- [28] DIN EN 196-1:1995: Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit. Deutsches Institut für Normung
- [29] DIN EN 196-3:1995: Prüfverfahren für Zement - Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit. Deutsches Institut für Normung
- [30] DIN EN 206-1:2000/A2:2005: Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Deutsches Institut für Normung
- [31] DIN 1045-2:2001-07 + DIN 1045-2/A1:2005-01: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1 einschließlich der A1-Änderungen. Deutsches Institut für Normung
- [32] Dittmer, C.; Mayer, D. T.: Project Report Printing inks - A publication of an online-lecture in the Internet. Hochschule für Druck und Medien, Stuttgart, http://www.hdm-stuttgart.de/projekte/printing-inks/b_selec0.htm, 03.05.2006
- [33] EKATO Rühr- und Mischtechnik GmbH: Handbuch der Rührtechnik. Schopfheim, 2000

- [34] The European Union - Brite EuRam III; EuroLightCon: Methods for Testing Fresh Lightweight Aggregate Concrete. Document BE96-3942/R4, 1999
- [35] Fabry, B.: Tenside: Eigenschaften, Rohstoffe, Produktion, Anwendungen. Chemie i.u.Z., 25, S 214-222, 1991
- [36] Forschungsinstitut der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie: Festigkeit und Schwinden von Schaumbeton. Forschungsbericht B 446/1, Wien, 1982
- [37] Freimann, T.: Einfluß von Steinkohlenflugaschen auf das rheologische Verhalten von Zementleimen und -mörteln. Dissertation, Berichte aus dem Institut für Baustoffe, Institut für Baustoffe, Universität Hannover, 2002
- [38] Fritsche, H.: Verfahren und Prozesse zur Schaumerzeugung. Studienarbeit, Institut für Baustoffe, Universität Hannover, 2004
- [39] Fritsche, H.: Entwicklung von aufschäumbaren Zementleimen. Diplomarbeit, Institut für Baustoffe, Universität Hannover, 2005
- [40] Glatthor, A.: Stärkeether als rheologische Additive in Trockenmörteln. 14. Schleibinger Kolloquium, 9. März 2005
- [41] Gnotke, O.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Bestimmung von veränderlichen Blasengrößen und Blasengrößenverteilungen in turbulenten Gas-Flüssigkeits-Strömungen. Dissertation, TU Darmstadt, 2004
- [42] Graf, O.: Gasbeton Schaumbeton Leichtkalkbeton. Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 1949
- [43] Grübel, P.; Weigler, H.; Karl, S.: Beton - Arten, Herstellung und Eigenschaften. Verlag Ernst & Sohn für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin, 2001
- [44] Griesser, A.: Cement-Superplasticizer Interactions at Ambient Temperatures. Dissertation Swiss Federal Institute of Technologie, Zurich, 2002
- [45] Habenicht, G.: Kleben - Grundlagen, Technologie, Anwendungen. Springer-Verlag Heidelberg, 1986

- [46] Hanehara, S.; Yamada, K.: Interaction between Cement and Chemical Admixture from the Point of Cement Hydration, Adsorption Behaviour of Admixture and Paste Rheology. *Cement and Concrete Research*, 29, S. 1159-1165, 1999
- [47] Hanselmann, W.: Influence of Continuous Whipping Process Parameters on Foam Structure and Stability. Dissertation, ETH Zürich, 1996
- [48] Hauck, H. G.: Fließmittel der neuen Generation für die Transportbetonindustrie. *beton*, Heft 3, S. 128 -130, 2004
- [49] Heinz, R.: Prozessoptimierung bei der Extrusion thermoplastischer Schäume mit CO₂ als Treibmittel. IKV-Berichte aus der Kunststoffverarbeitung, Band 131, Institut für Kunststoffverarbeitung an der RWTH Aachen, 2002
- [50] Hewlett, P. C.: *Cement Admixtures - Use and Applications*. Longman Group UK Limited, 1988
- [51] Hilsdorf, H.; Kottas, R.: Der Einfluß der Temperatur auf die Wirksamkeit von Luftporenbildnern. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 274, Bonn-Bad Godesberg, 1979
- [52] Hochtief Construction AG: Dämpferbeton. Unterlagen zum Kolloquium am 12. April 2005 im Technologie-Centrum Walldorf
- [53] Hoer, R.: Sehr stabile Schäume durch Anlagerung silikatischer Nanopartikel an die Bläschenoberflächen. Informationsdienst Wissenschaft, Pressemitteilung der Gesellschaft Deutscher Chemiker, 23.06.2005
- [54] Höveling, H.: Robustheit von Selbstverdichtendem Beton (SVB). Dissertation, Berichte aus dem Institut für Baustoffe, Institut für Baustoffe, Universität Hannover, 2006
- [55] Höveling, H.: Frischbetontechnologie für SVB und andere Hochleistungsbetone. 45. Forschungskolloquium des DAfStb, Wien, 6. und 7. Oktober 2005
- [56] Holmberg, K. (Hrsgb.): *Handbook of applied surface and colloid chemistry* Vol. 1. John Wiley & Sons, Chichester, 2002

- [57] Husmann, I.: Gezieltes Einbringen feinverteilter, geschlossener Luftporen in Zementmörtel. Studienarbeit, Institut für Baustoffe, Universität Hannover, 2003
- [58] Isola Bauchemie: Informationstag für Baustofftechnologien. Salzkotten, Februar 2005
- [59] Jüntgen, H.; Schwuger, M.: Aussagekraft der Quecksilber- porosimetrie bei der Charakterisierung poröser Stoffe. Chemie Ingenieur Technik - CIT, Jahrg. 38, Heft 12, S. 1271-1278, 1966
- [60] Karl, S.: Leichtzuschlag-Schaumbeton als Konstruktionsleichtbeton mit abgeminderter Rohdichte. Dissertation, Darmstadt, 1979
- [61] Karl, T.: Verwendung organischer Stabilisierer in aufschäumbaren Zementleimen. Diplomarbeit, Institut für Baustoffe, Universität Hannover, 2005
- [62] Kazirukanyo, J. B.; Tenoutasse, N.: Investigation of the Interactions between Superplasticizers and C_3A , C_4AF and Calcium Sulfo-aluminates through the Adsorption Mechanism. 14. Int. Baustofftagung ibausil, Band 1, S. 357-369, Weimar, 2000
- [63] Keck, H.-J.: Untersuchung des Fließverhaltens von Zementleim anhand rheologischer Messungen. Dissertation, Institut für Bauphysik und Materialwissenschaften, Universität GH Essen, Shaker-Verlag, Aachen, 1999
- [64] Kern, T.: Neues Verfahren zur experimentellen Untersuchung wässriger Schäume. Dissertation D 466 Universität GH Paderborn, 2002
- [65] Prud'homme, R. K.; Khan, S. A. (Hrsgb.): Foams: Theory, Measurements and Applications. Marcel Dekker Inc., New York, Basel, Hong Kong, 1996
- [66] Knoblauch, H.; Schneider, U.: Bauchemie. 4. Auflage, Werner-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1995
- [67] Koehler, S. A.; Hilgenfeld, S.; Stone, H. A.: Liquid Flow through Aqueous Foams: The Node-Dominated Foam Drainage Equation. Physical Review Letter, 82/21, S. 4232-4235, 1999
- [68] Kraume, M. (Hrsgb.): Mischen und Rühren. Grundlagen und moderne Verfahren. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, Weinheim, 2003

- [69] Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz KrW-/AbfG: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen. BGBl I 1994, 2705, 27.09.1994
- [70] Lohaus, L.; Pott, J. U.: Konstruktionsleichtbeton unter Verwendung vorgeschäumter Luftporen. Forschungsbericht, Institut für Baustoffe, Universität Hannover, 2005
- [71] Lohaus, L.: Schlussbericht zum Forschungsvorhaben DBV 218: Anwendbarkeit vorgeschäumter Luftporen im Betonbau. Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Bauingenieurwesen, September 2000
- [72] Maidl, U.: Erweiterung der Einsatzbereiche der Erddruckschilde durch Bodenconditionierung mit Schaum. Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen, Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, 1995
- [73] Malhotra, V. M.; Carette, G. G.: Performance of Concrete Incorporating Limestone Dust as Partial Replacement for Sand. Journal of the American Concrete Institute, Heft 3, S. 363-371, 1985
- [74] Manegold, E.: Schaum. Straßenbau, Chemie und Technik Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg, 1953
- [75] Manegold, E.: Allgemeine und angewandte Kolloidkunde. Band 1. Straßenbau, Chemie und Technik Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg, 1956
- [76] Marquardt, I.: Ermittlung des Wasseranspruchs von feinteiligen Ausgangsstoffen für Beton. Beton, S. 490-492, Heft 10, 2003
- [77] Mewes, D.: Technik der mehrphasigen Strömungen nicht-mischbarer fluider Phasen; GVC-Tagung „Technik der mehrphasigen Strömungen nicht-mischbarer fluider Phasen - Schäume, Emulsionen“, VDI-Verlag, Köln, 1992
- [78] Mittendrein, H.; Schneider, R.: Schaumbeton mit Leichtzuschlag als Wandbaustoff. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben Zl. F 981, 1989
- [79] Möbius, D.; Miller, R. (Hrsgb.): Proteins at Liquid Interfaces. Elsevier, Amsterdam, Lausanne, New York, 1998
- [80] Müller, H. S.; Kvitsel, V.: Kriechen und Schwinden von Beton. Beton- und Stahlbetonbau, S. 8-19, Heft 1, 2002

- [81] Okamura, Hajime; Ozawa, Kazumasa: Mix Design For Self-Compacting Concrete. Concrete Library of JSCE No. 25, June 1995
- [82] Pier, J.; Pahl, M. H.: Aufbau und Festigkeit zementgebundener Schaum-
mörtel. Zement-Kalk-Gips, S. 697-702, Heft 12, 1994
- [83] Plank, J.; Hirsch, Ch.; Winter, Ch.; Chatziagorastou, P.: Neues zur Wir-
kungsweise von Polycarboxylat-basierten Fließmitteln. 15. Int. Baustoff-
tagung ibausil, Band 1, S. 1393-1408, Weimar , 2003
- [84] POROTEC GmbH: Produktinformationen unter
<http://www.porotec.de/>, 09.07.2006
- [85] Powers, T. C.: The Properties of Fresh Concrete. J. Wiley + Sons Inc.
New York, London, Sydney, Toronto, 1968
- [86] Puntke W.: Wasseranspruch von feinen Kornhaufwerken. beton, Nr. 5, S.
242 - 248, 2002
- [87] Ramachandran, V. S.: Concrete Admixtures Handbook. Noyes Publicati-
ons, Park Ridge, New Jersey, USA, 1984
- [88] Ramachandran, V. S.; Beaudoin, J. J.: Handbook of Analytical Techni-
ques in Concrete Science and Technology. Noyes Publications, Park Ridge,
New Jersey, USA, 1999
- [89] Readymix AG: Baustofftechnische Daten. 18. Auflage, 2002
- [90] Richartz, W.; Locher, F. W.: Ein Beitrag zur Morphologie und Wasser-
bindung von Calciumsilicathydraten und zum Gefüge des Zementsteins.
Zement-Kalk-Gips, S. 449-459, Heft 9, 1965
- [91] Rinder, T.: Autogenes Schwinden von hochfestem Beton. Vortrag zur For-
schungsbesprechung am 23.02.2000, Institut für Werkstoffe im Bauwesen,
Uni Stuttgart
- [92] Falbe, J.; Regitz, M. (Herausg.): Römpp-Chemie-Lexikon. Georg Thieme
Verlag, Stuttgart, 1992
- [93] Rößler, C.; Stark, J.: Der Einfluß von Fließmitteln auf die Hydratation
von Portlandzement. 15. Ibausil, Weimar, S. 1-0509 - 1-0523, 2003

- [94] Sakata, N.; Maruyama, K.; Minami, M.: Basic Properties and Effects of Welan Gum on Selfconsolidating Concrete. Proceedings of the International RILEM Conference on Production Methods and Workability of Concrete, June 3-5, 1996, Paisley, Scotland, S. 389-397, 1996
- [95] Schachinger, I.; Schmiedmayer, R.: Zusammenspiel von Wasser, Feinstoffen, Fließmittel und Luftporen in der modernen Betontechnologie. TU München, Institut für Baustoffe und Konstruktion, 2001
- [96] Scheidegger, F.: Leichtbeton für Nichtkonstruktions-Bauteile. Bau, Jg. 66, Nr. 8, S. 443-445, Zürich, 1987
- [97] Schramm, G.: Einführung in die Rheologie und Rheometrie. Gebrüder Haake GmbH, Karlsruhe, 1995
- [98] Schrimpf, M.; Lietzmann, M.; Orgass, M.; Dehn, F.: Stabilisierende Wirkung von Mikrosilika auf SVB. Leipzig Annual Civil Engineering Report No. 7, Leipzig, 2002
- [99] Schubert, H.: Kapillardruck und Zugfestigkeit von feuchten Haufwerken aus körnigen Stoffen. Chemie-Ingenieur-Technik, Jg. 45, Nr. 6, S. 396-401, 1973
- [100] Seifert, H.; Buhl, R.; Seifert, K.-F.: Feinstrukturelle Überlegungen zu Adsorptionsvorgängen an Quarzgrenzflächen. Kolloid-Zeitschrift 141, H. 3, S. 146-159, 1955
- [101] Sita Ram Sarma, D. S. H., Khilar, K. C.: Comments on Effects of Electrolyte on the Drainage of Aqueous Foams. Journal of Colloid and Interface Science, 137, S. 300-303, 1990
- [102] Spanka, G.; Grube, H.; Thielen, G.: Wirkungsmechanismen verflüssigender Betonzusatzmittel. Betontechnische Berichte 1995-1997, S. 45-60, Verlag Bau und Technik, Düsseldorf, 1998
- [103] Stark, J.; Fischer, H.; Gathemann, B.: Schaumgips aus Calciumsulfatbindern. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen, Jg. 41, Nr. 6/7, Weimar, 1995
- [104] Stark, K.: Rheologische Eigenschaften von Schäumen und deren Beeinflussung unter Berücksichtigung der Schaumstabilität. Dissertation, Universität Bayreuth, 1999

- [105] Stark, J.; Möser, B.; Eckart, A.: Neue Ansätze zur Zementhydratation. ZKG international No. 01/2001 (Teil 2), 2001
- [106] Strauß, W.: Verwendung von pulverförmigen Polycarboxylaten als Fließmittel für caseinfreie selbstverlaufende zementäre Fußbodenspachtel- und Ausgleichsmassen. 3. Bauchemie Kongress, Tagungsband S. 37-52, 2001
- [107] Stürmer, S.; Mielke, I.; Stark, J.: Injektionsschaummörtel für die Bauwerkssanierung. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen, Jg. 40, Nr. 5/6/7, Weimar, 1994
- [108] Tang, F.-Q.; Xiao, Z.; Tang, J.-A.; Jiang, L.: The Effect of SiO₂ Particles upon Stabilization of Foam. Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 131, No. 2, September 1989
- [109] Thomas, D. G.: Non-Newtonian Suspensions. I. Physical Properties and Laminar Transport Characteristics. Ind. and Engng. Chem. 55, S. 18-29, 1963
- [110] Uchikawa, H.; Hanehara, S.: Effect of Admixture on Hydration of Cement, Adsorptive behaviour of Admixture and Fluidity and Setting of Fresh Cement Paste. Cement and Concrete Research, 22, S. 1115-1129, 1992
- [111] Uchikawa, H.; Sawaki, D.; Hanehara, S.: Influence of kind and added timing of Organic Admixture on the Composition, Structure and Property of Fresh Cement Paste. Cement and Concrete Research, 25, S. 353-364, 1995
- [112] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.): Zement-Taschenbuch 2002. Verlag Bau+Technik, Düsseldorf, 2002
- [113] Verwey, E. J.; Overbeek, T. J. G.: Theory of the Stability of Lyophobic Colloids. Elsevier, Amsterdam, 1948
- [114] Walter, L.: Mathematische Simulation stochastischer Kugelpackungen. Dissertation, Bergakademie Freiberg, 1984
- [115] Walz, K.: Luftporenbildende Betonzusatzmittel. DAfStb Heft 123, Verlag Ernst & Sohn Berlin, 1956
- [116] Weaire, D.; Banhart, J. (Hrsgb.): Foams and Films. Verlag Metall Innovation Technologie, Bremen, 1999

-
- [117] Weaire, D.; Hutzler, S.; Verbist, G.; Peters, E.: A Review of Foam Drainage. *Advanced in Chemical Physics*, 102, S. 315-374, 1997
- [118] Weigler, H.; Karl, S.; Jaegermann, Ch.: Leichtzuschlag-Beton mit hohem Gehalt an Mörtelporen. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 321*, Berlin 1981
- [119] Weipert, D.; Tscheuschner, H.-D.; Windhab, E.: *Rheologie der Lebensmittel*. Behr's Verlag, Hamburg, 1993
- [120] Wesche, K.: *Baustoffe für tragende Bauteile Teil 2: Beton und Mauerwerk*. Bauverlag GmbH Wiesbaden u. Berlin, 1993
- [121] Widmann; H.; Enoekl, V.: Schaumbeton - Baustoffeigenschaften, Herstellung. *Betonwerk und Fertigteiltechnik*, Heft 6, S. 38-44, 1991
- [122] Wilke, H.-P.; Buhse, R.; Groß, K.: *Mischer - Verfahrenstechnische Grundlagen und apparative Anwendungen*. Vulkan-Verlag, Essen, 1991
- [123] Wilson, A. J. (Hrsgb.): *Foams: Physics, Chemistry and Structure*. Springer-Verlag New York, 1989
- [124] Windhab, E.: Zur Technologie geschäumter Stoffsysteme im Lebensmittelbereich. Teil 1: Grundlagen/Rheologie und Strukturverhalten. *Lebensmitteltechnik*, 3, 95-102, 1991
- [125] Windhab, E.: Auf- und Abbau von Schaumstrukturen mittels mechanischer und physikochemischer Hilfsmittel. Tagungsbeitrag, *Technik der mehrphasigen Strömungen nicht-mischbarer fluider Phasen - Schäume, Emulsionen*, Köln, 2./3. Juni 1992
- [126] Wolff Walsrode: *Walocel M - Methyl hydroxy propyl cellulose - Methyl hydroxy ethyl cellulose*. Englische Produktinformation, Wolff Walsrode, 1993
- [127] Wübben, T.: Zur Stabilität flüssiger Metallschäume. *Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 3 - Verfahrenstechnik*, VDI Verlag, Düsseldorf, 2004
- [128] Wünsch, O.: *Strömungsmechanik des laminaren Mischens*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001
- [129] Wüstholtz, T.: *Experimentelle und theoretische Untersuchung der Frischbetoneigenschaften von Selbstverdichtendem Beton*. Dissertation, Fakultät für Bau- und Umweltwissenschaften, Universität Stuttgart, 2005

- [130] Yamada, K.; Takahashi, T.; Hanehara, S.; Matsuhisa, M.: Effects of the chemical Structure on Properties of Polycarboxylate-type Superplasticizers. *Cement and Concrete Research*, 30, S. 197-207, 2000
- [131] Yamada, K.; Ogawa, S.; Hanehara, S.: Controlling of the Adsorption and Dispersing Force of Polycarboxylate-type Superplasticizers by Sulfate Ion Concentration in Aqueous Phase. *Cement and Concrete Research*, 31, S. 375-383, 2001
- [132] Zlokarnik, M.: *Rührtechnik - Theorie und Praxis*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999

Lebenslauf

Name: Jens Uwe Pott

Geboren: 22. März 1976 in Bochum-Wattenscheid

Eltern: Uwe Pott und Ursel Pott, geb. Röder

Familienstand: ledig, keine Kinder

Ausbildung: 08/82 - 07/86 Grundschule in Bochum-Eppendorf
08/86 - 06/95 Hellweg-Schule, städtisches Gymnasium
mit differenzierter Oberstufe,
in Bochum-Wattenscheid
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife
07/95 - 08/96 Zivildienst
10/96 - 09/01 Studium Bauingenieurwesen
an der Ruhr-Universität Bochum
Abschluss: Diplom-Ingenieur

Berufliche Tätigkeit: seit 01/02 Wissenschaftlicher Mitarbeiter
am Institut für Baustoffe
der Leibniz Universität Hannover

Berichte aus dem Institut für Baustoffe

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus

- Heft 1 Thomas Freimann: „Einfluß von Steinkohlenflugaschen auf das rheologische Verhalten von Zementleimen und -mörteln“, 2002
- Heft 2 Susanne Thoke-Weidlich: „Alkaliionendiffusion in carbonatisierte und nicht carbonatisierte Betone“, 2002
- Heft 3 Lasse Petersen: „Einfluss baustofflicher Schädigungsprozesse auf das Tragverhalten von Stahlbetonbauteilen“, 2003
- Heft 4 Holger Höveling: „Robustheit von Selbstverdichtendem Beton (SVB)“, 2006
- Heft 5 Jens Uwe Pott: „Entwicklungsstrategien für zementgebundene Schäume“, 2006

Mitteilungen des Instituts für Baustoffkunde und Materialprüfung

Die Hefte der bis 1995 laufenden Schriftenreihe „Mitteilungen des Instituts für Baustoffkunde und Materialprüfung“ können ebenfalls über das Institut für Baustoffe der Leibniz Universität Hannover bezogen werden. Eine Zusammenstellung der 67 Hefte dieser Schriftenreihe ist der unten aufgeführten Homepage des Instituts für Baustoffe zu entnehmen. Sie repräsentieren die Arbeiten des Instituts vor der Namensänderung in 2001.

Die Hefte sind zu beziehen von:

Institut für Baustoffe
Leibniz Universität Hannover
Appelstr. 9A und Nienburger Str. 3
30167 Hannover

Tel.: 0511/762-3722

Fax: 0511/762-4736

www.institut-fuer-baustoffe.de