

IGF-Forschungsvorhaben Nr.: 15545 N  
Bewilligungszeitraum: 01.03.2008 – 28.02.2010  
Forschungsthema: **Zusammenwirken von Luftporenbildner und Fließmittel in Beton**

## 1 Einleitung

Für Betone der Expositionsclassen XF2 und XF3 mit einem w/z-Wert von 0,55 und für Beton in der Expositionsklasse XF4 ist die Verwendung eines LP-Bildners zum Erreichen eines ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstands vorgeschrieben. Die LP-Bildner sollen im Beton einen ausreichenden Gehalt an kleinen, fein verteilten Mikro-Luftporen erzeugen, die als Ausweichraum zum Abbau des beim Gefrieren der Porenflüssigkeit entstehenden Drucks dienen. Zusätzlich wird die kapillare Wasseraufnahme des Betons verringert. Der Gehalt an kleinen Poren wird mit der Bestimmung des Mikro-Luftporengehaltes (Gehalt aller Poren bis zu einem Durchmesser von 300 µm) und des Abstandsfaktors am Festbeton beurteilt. Der Abstandsfaktor ist ein aus einem idealisierten Porensystem abgeleiteter Kennwert für den Abstand eines Punktes des Zementsteins von der nächsten Luftpore. Um einen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand von Beton zu gewährleisten, muss in der Erstprüfung der Gehalt an Mikro-Luftporen mindestens 1,8 Vol.-% betragen. Der Abstandsfaktor darf 0,20 mm nicht überschreiten. Umfangreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass für den Nachweis eines ausreichenden Gehalts an kleinen Poren bei Verwendung eines geeigneten Luftporenbildners die Bestimmung des Gesamtluftgehalts am Frischbeton im Allgemeinen genügt. Dieser Gesamtluftgehalt muss beispielsweise bei einem Größtkorn der Gesteinskörnung von 16 mm mindestens 4,5 Vol.-% betragen (Einzelwert  $\geq 4,0$  Vol.-%).

Um den Beton länger und leichter verarbeiten zu können, werden weiche Betone mit und ohne Zugabe von Verflüssigern bzw. Fließmitteln eingesetzt. Aus der Praxis wurde über Probleme bei der Herstellung von Luftporenbeton in Kombination mit der Verwendung von Fließmitteln, insbesondere auf der Basis von Polycarboxylatethern (PCE), berichtet. Das Luftporengefüge war nicht stabil, wobei sich der Luftgehalt insgesamt bzw. die Luftporengrößenverteilung verändern konnten. Vereinzelt wurden trotz Einhaltung des Gesamtluftgehalts im Frischbeton die Anforderungen an die am Festbeton ermittelten Luftporenkennwerte nicht erreicht. Die zielsichere Einstellung des Mikro-Luftporengefüges, das Frost- und Frost-Tausalzschäden verhindert, ist in diesem Fall nicht mehr gegeben und damit ist möglicherweise die Dauerhaftigkeit beeinträchtigt.

Um zu untersuchen, inwieweit Wechselwirkungen zwischen LP-Bildnern und Fließmitteln das Luftporengefüge beeinflussen, wurde im Forschungsinstitut der Zementindustrie ein Forschungsvorhaben durchgeführt.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 15545 N der Forschungsvereinigung Verein Deutscher Zementwerke e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

## 2 Forschungsziel und Lösungsweg

In dem Forschungsvorhaben sollte untersucht werden, inwieweit Wechselwirkungen zwischen LP-Bildnern und Fließmitteln in Abhängigkeit des Zements und der Wirkstoffbasis der Zusatzmittel das Luftporengefüge beeinflussen können. Um die Auswirkungen der kombinierten Zugabe von Fließmittel und LP-Bildner auf die Luftporenbildung zu erforschen, wurden die Untersuchungen in vier Schwerpunkte unterteilt.

Zunächst wurden in einem ersten Abschnitt die Ausgangsstoffe Zement, Fließmittel und LP-Bildner ausgewählt. Die Auswahl der Zusatzmittel (Fließmittel und LP-Bildner) erfolgte in Absprache mit der Zusatzmittelindustrie unter Berücksichtigung vorliegender Erkenntnisse zur Zusammensetzung und Molekülstruktur der Fließmittel.

In einem zweiten Abschnitt wurde zur Abschätzung der Beeinflussung der Luftporenbildung und einer etwaigen entschäumenden Wirkung der jeweiligen LP-Bildner/Fließmittel/Zement-Kombination das Schaumbildungsvermögen an Zementsuspensionen ermittelt. Zusätzlich wurden Feinbetone mit einem Luftgehalt von rd. 5,5 Vol.-% hergestellt und anschließend Fließmittel in mehreren Stufen zugegeben. Nach jeder Teilzugabe wurden der Luftgehalt des Feinbetons und das Ausbreitmaß bestimmt.

Neben der entschäumenden Wirkung des Fließmittels kann die Luftporenbildung möglicherweise durch das Sorptionsverhalten der Zusatzmittel beeinflusst werden. In einem dritten Abschnitt wurde daher das Sorptionsverhalten der Zusatzmittel an Zement in Flotationsversuchen untersucht. Zusätzlich wurden mit Fließmittel dotierte Zementleime abfiltriert, um den im Filtrat gelösten Anteil des Fließmittels und daraus den sorbierten Anteil zu ermitteln.

In einem vierten Abschnitt wurden mit ausgewählten LP-Bildner/Fließmittel/Zement-Kombinationen Betone mit einem Luftgehalt von rd. 5,5 Vol.-% und einem Ausbreitmaß der Konsistenzklasse F4 hergestellt. In Abhängigkeit der Ausgangsstoffkombination sollten die Wechselwirkungen zwischen Luftporenbildner, Fließmittel und Zement und deren Auswirkungen auf die Luftporenbildung und -stabilität im Frischbeton sowie das Luftporengefüge im erhärteten Beton dargestellt werden. Dabei sollten insbesondere robuste Zement-Zusatzmittelkombinationen identifiziert werden.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Ausgangsstoffe

#### a) Zusatzmittel LP-Bildner und Fließmittel

In Abstimmung mit drei Zusatzmittelherstellern wurden fünf PCE und zur Anknüpfung an den bisherigen Erfahrungsbereich auch zwei Fließmittel auf der Basis von Melamin- bzw. Naphthalinsulfonat ausgewählt. Zwei Hersteller lieferten jeweils ein PCE für den Fertigteilbereich und ein PCE für den Transportbetonbereich. Vom dritten Hersteller wurde ein PCE bereitgestellt, das in beiden Bereichen eingesetzt wird. Obwohl zu den PCEs keine detaillierten Informationen zur Zusammensetzung gegeben wurden, können folgende Angaben gemacht werden: PCE für den Transportbetonbereich wirken länger verflüssigend als PCE für den Fertigteilbereich. Dementsprechend weisen PCE für Transportbeton eher eine niedrigere Ladungsdichte und längere Seitenketten auf als PCE für den Fertigteilbereich mit tendenziell höherer Ladungsdichte und kürzeren Seitenketten.

Neben den Fließmitteln wurden von den Herstellern LP-Bildner mit unterschiedlicher Wirkstoffbasis zur Verfügung gestellt. Außerdem wurde vom FIZ jeweils ein LP-Bildner auf natürlicher und synthetischer Wirkstoffbasis ausgewählt. Der natürliche LP-Bildner weist eine geringe Löslichkeit in der Porenlösung auf und fällt zum großen Teil aus. Der synthetische LP-Bildner verbleibt aufgrund der sehr guten Löslichkeit in der Porenlösung. Die im Versuchsprogramm verwendeten Zusatzmittel sind in Tabelle 1 aufgelistet.

**Tabelle 1** Übersicht über die verwendeten Fließmittel und LP-Bildner

Zusatzmittel	Hersteller 1	Hersteller 2	Hersteller 3
PCE Transportbeton	1 PCE	1 PCE	1 PCE geeignet für beide Anwendungsbereiche
PCE Fertigteil	1 PCE	1 PCE	
Herköm. Fließmittel	Naphthalinsulfonat	Melaminsulfonat	-
LP-Bildner	Wurzelharzseife	modifiziertes Wurzelharz	Synthetisches Tensid 1 Synthetisches Tensid 2

## b) Zement

Für die Herstellung der Zementleime und -suspensionen sowie der Betone wurden drei Zemente ausgewählt: Portlandzement CEM I, Portlandkalksteinzement CEM II/A-LL und Hochofenzement CEM III/A LH/NA jeweils der Festigkeitsklasse 42,5 N (Tabelle 2). Die Zemente entstammen unterschiedlichen Werken und wurden somit mit unterschiedlichen Portlandzementklinkern hergestellt.

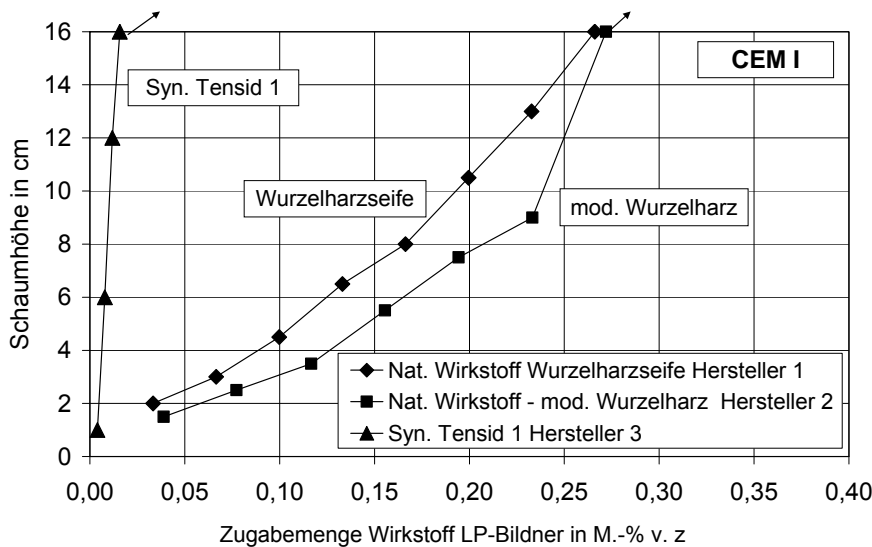
**Tabelle 2** Chemische und physikalische Kennwerte der verwendeten Zemente

Kennwert		CEM I 42,5 N	CEM II/A-LL 42,5 N	CEM III/A 42,5 N LH/NA
K <sub>2</sub> O	M.-%	0,88	0,85	0,91
Na <sub>2</sub> O	M.-%	0,13	0,09	0,23
Na <sub>2</sub> O-Äquiv.	M.-%	0,71	0,65	0,83
Na <sub>2</sub> O-Äquiv. ohne Hüttensand	M.-%	-	-	0,93
CO <sub>2</sub>	M.-%	2,02	5,52	1,72
Wasser	M.-%	0,41	0,35	0,93
Hüttensandgehalt	M.-%	-	-	50,6
Kalksteingehalt	M.-%	-	14,0	-
Erstarrungsbeginn	min	160	200	220
Wasseranspruch	%	27,0	29,0	30,0
Spez. Oberfläche nach Blaine	cm <sup>2</sup> /g	3250	3680	4210
Le Chatelier	mm	0	0	0
Druckfestigkeit				
2 Tage		25,1	26,2	17,0
7 Tage		42,4	39,9	34,6
28 Tage	N/mm <sup>2</sup>	56,5	49,3	52,1
Biegezugfestigkeit				
2 Tage		4,8	5,5	4,1
28 Tage		9,4	8,9	10,0

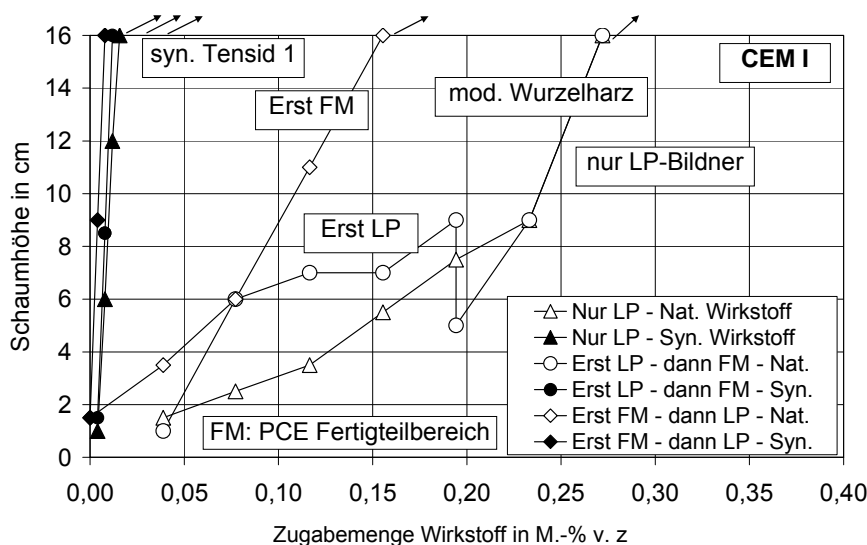
### 3.2 Schaumbildung in Zementsuspensionen bzw. Luftporenbildung in Feinbeton

#### a) Schaumbildung in Zementsuspension

In einem in früheren Untersuchungsprogrammen erprobten Versuchsablauf (AiF 14145 N) wurden in einem Standzylinder Wasser, Zement und Zusatzmittel gemischt, feine Luftblasen in die Suspension eingebracht und die Höhe des entstehenden Schaums gemessen. Der Versuch wurde abgebrochen, wenn der Schaum aus dem Zylinder herausrat (Schaumhöhe > 16 cm). Zunächst wurde in einem „Referenzversuch“ die Schaumentwicklung der LP-Bildner bzw. der Fließmittel allein ermittelt. Anschließend wurde bei kombinierter Verwendung von LP und FM der Einfluss des Zeitpunkts der Fließmittel-Zugabe untersucht. In einem Fall wurde das Fließmittel vor dem LP-Bildner zugegeben (Erst FM), im zweiten Fall wurden zuerst der LP-Bildner (Zugabemenge für eine Schaumhöhe von rd. 8 cm) und dann das Fließmittel zugegeben (Erst LP). Die Schaumbildung wurde wesentlich durch die Wirkstoffart des LP-Bildners beeinflusst. Aufgrund der guten Löslichkeit war die Schaumbildung beim synthetischen LP-Bildner wesentlich effektiver als bei den LP-Bildnern auf natürlicher Wirkstoffbasis (Bild 1). Die Zementart beeinflusste die Schaumbildung kaum. Die Zugabereihenfolge der Zusatzmittel wirkte sich stark auf die Schaumbildung aus. Wurde zuerst das Fließmittel und dann der LP-Bildner zugegeben, war die Schaumbildung effektiver (Bild 2).



**Bild 1**  
Schaumbildung in Zementsuspension in Abhängigkeit von der Art und Zugabemenge des LP-Bildners (CEM I-Zement)



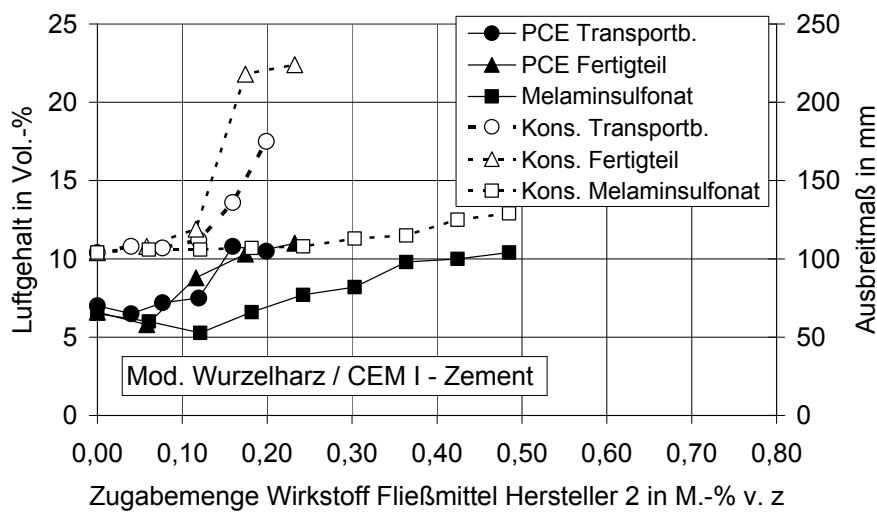
**Bild 2**  
Schaumbildung in Zementsuspension in Abhängigkeit von der Art und Zugabemenge des LP-Bildners und der Zugabereihenfolge des LP-Bildners und des Fließmittels (PCE Fertigteilbereich des Herstellers 2, CEM I-Zement)

Eine geringere Schaumentwicklung wurde festgestellt, wenn zuerst der LP-Bildner und dann das Fließmittel zugegeben wurde. Die in Bild 2 beispielhaft dargestellten Ergebnisse (CEM I-Zement, PCE-Fertigteil des Herstellers 2) wurden auch bei Verwendung von CEM II- bzw. CEM III-Zement und in Kombination mit den anderen Fließmitteln festgestellt. Eine Ausnahme bildete das synthetische Tensid 2 des Herstellers 3. Mit diesem LP-Bildner war eine Schaumbildung nur dann möglich, wenn zuerst das Fließmittel und dann der LP-Bildner zugegeben wurde. Möglicherweise sind in der Praxis aufgetretene Effekte bei der Luftporenbildung im Beton u. a. auf Unterschiede in der Zugabe-Reihenfolge zurückzuführen.

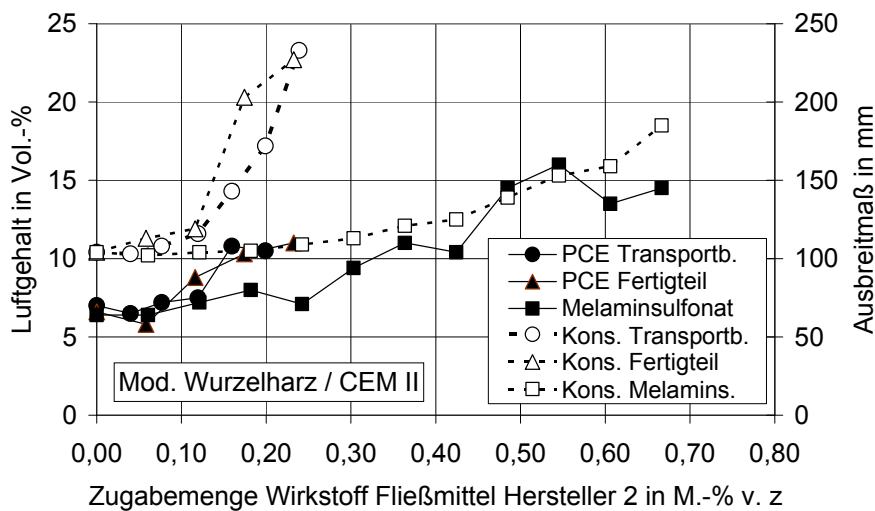
#### b) Luftporenbildung in Feinbeton

In Untersuchungen an Feinbetonen (Größtkorn 4 mm) mit steifer Ausgangskonsistenz und einem Luftgehalt von rd. 5,5 Vol.-% sollte untersucht werden, ob nach der Zugabe des Fließmittels eine Veränderung des Luftgehalts - z. B. Abfall des Luftgehalts infolge entschäumender Wirkung des Fließmittels - auftritt. Die Zusatzmittel wurden einem Feinbeton mit einem Zementgehalt von 400 kg/m<sup>3</sup> und einem w/z-Wert von 0,42 zugegeben. Das Gesteinskörnungsgemisch bestand aus 6,9 Vol.-% Quarzmehl 0/0,1 mm, 23,1 Vol.-% Rheinkie sand 0/2 mm und 70 Vol.-% Quarzkies 2/4 mm. Der Gehalt an Gesteinskörnungen betrug 1666,5 kg/m<sup>3</sup>. Die Zugabemenge des LP-Bidners wurde in Vorversuchen so festgelegt, dass bei einer Frischbetontemperatur von rd. 20 °C der Luftgehalt des Feinbetons nach zweiminütiger Mischzeit (5,5 ± 0,5) Vol.-% betrug. Anschließend wurden dem Feinbeton das jeweilige Fließmittel in mehreren Stufen von 0,2 (PCE) bzw. 0,3 M.-% v. z. (herkömmliche Fließmittel) zugegeben. Die Mischzeit nach jeder Teil-Zugabe betrug 30 Sekunden. Nach jeder Fließmittel-Zugabe wurden der LP-Gehalt des Feinbetons (1 I-Drucktopf) und die Konsistenz (Ausbreitmaß Hägermantisch) ermittelt.

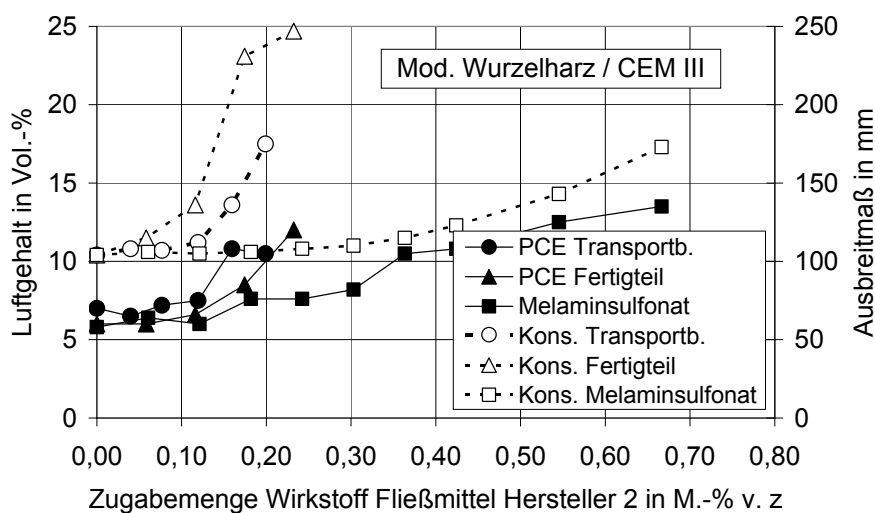
Mit dem synthetischen Tensid 2 war trotz überhöhter Zugabemengen keine Luftporenbildung möglich. Die beiden Wurzelharze erforderten vergleichbare Zugabemengen. Mit dem synthetischen Tensid 1 wurden im Vergleich zu den LP-Bidnern auf natürlicher Wirkstoffbasis wesentlich geringere Zugabemengen benötigt. Im Vergleich zum CEM I-Zement waren beim CEM II- und beim CEM III-Zement unabhängig von der Wirkstoffart des LP-Bidners höhere Dosierungen notwendig. Die Ergebnisse sind beispielhaft in den Bildern 3a bis 3f mit den drei Fließmitteln des Herstellers 2 dargestellt, die in Kombination mit den drei Zementen und zwei LP-Bidnern (mod. Wurzelharz, synthetisches Tensid 1) untersucht wurden. Nach Zugabe der ersten und zweiten Fließmittel-Teilzugabe war bei dem LP-Bidner mit natürlicher Wirkstoffbasis ein geringer Luftgehaltsabfall oder ein gleichbleibender Luftgehalt zu verzeichnen (Bild 3a bis 3c). Nach mehreren Stufen der Fließmittel-Zugabe stieg der Luftgehalt insgesamt an. Beim synthetischen LP-Bidner 1 stieg der Luftgehalt bereits nach der ersten Fließmittel-Zugabe an (Bild 3d bis 3e). Der Anstieg fiel wesentlich stärker aus als beim LP-Bidner mit natürlicher Wirkstoffbasis. Bei Verwendung der Fließmittel auf PCE-Basis war der Anstieg des Luftgehalts stärker ausgeprägt als bei den herkömmlichen Fließmitteln. Zwischen den PCEs (Transportbeton und Fertigteil) und dem CEM I- und CEM II-Zement war kein nennenswerter Unterschied festzustellen. Beim CEM III-Zement war der Anstieg etwas stärker ausgeprägt als beim CEM I-Zement. Ein nennenswerter Abfall des Luftgehalts durch eine entschäumende Wirkung des Fließmittels konnte in keinem Fall festgestellt werden. Die maßgeblichen Unterschiede wurden durch die Zusatzmittelkombination LP-Bidner und Fließmittel hervorgerufen, die durch den Zement (CEM I bzw. CEM III) hervorgerufenen Unterschiede waren vergleichsweise gering. Kombinationen mit einem synthetischen LP-Bidner



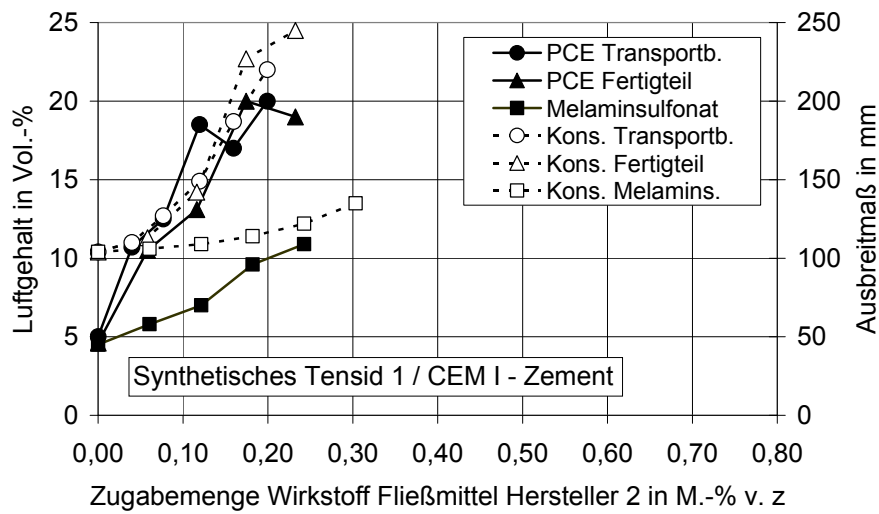
**Bild 3a**  
Luftporenbildung und Verarbeitbarkeit in Abhängigkeit von der Art und Zugabemenge der Fließmittel des Herstellers 2 (Kombination Wurzelharz/ CEM I-Zement)



**Bild 3b**  
Luftporenbildung und Verarbeitbarkeit in Abhängigkeit von der Art und Zugabemenge der Fließmittel des Herstellers 2 (Kombination Wurzelharz/ CEM II-Zement)

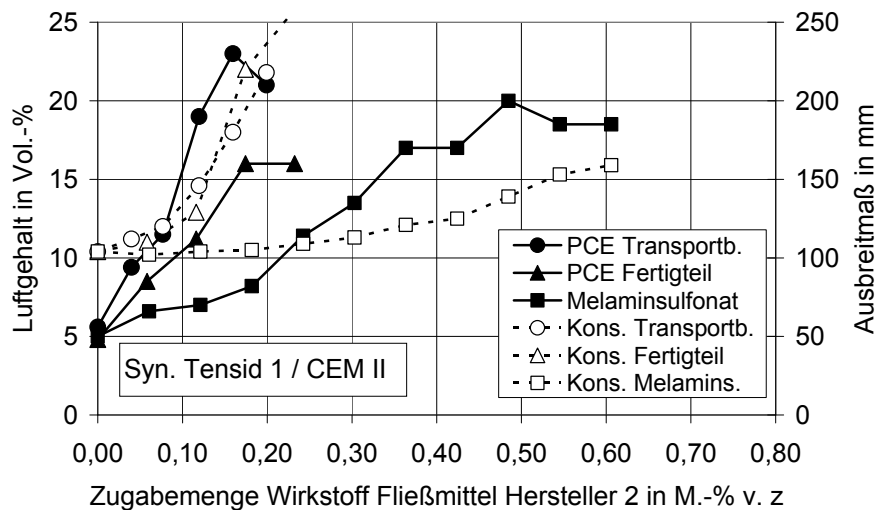


**Bild 3c**  
Luftporenbildung und Verarbeitbarkeit in Abhängigkeit von der Art und Zugabemenge der Fließmittel des Herstellers 2 (Kombination Wurzelharz/ CEM III-Zement)



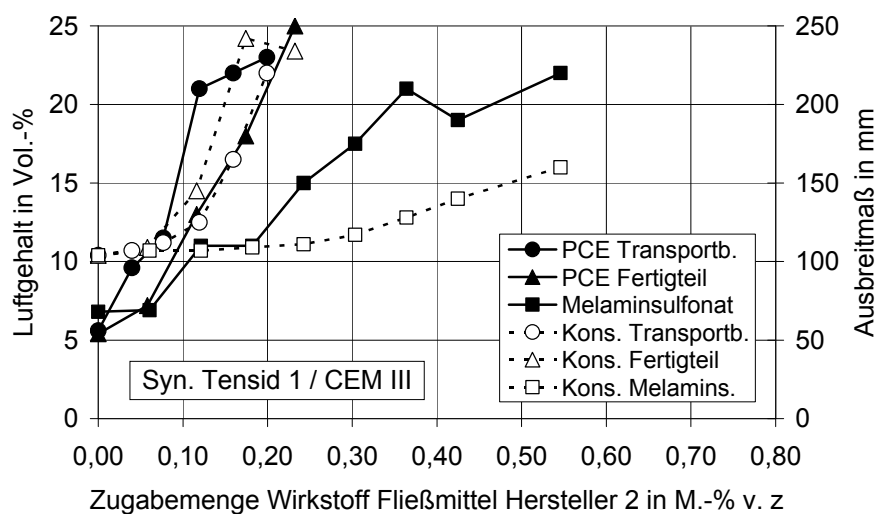
**Bild 3d**

Luftporenbildung und Verarbeitbarkeit in Abhängigkeit von der Art und Zugabemenge der Fließmittel des Herstellers 2 (Kombination synthetisches Tensid 1/ CEM I-Zement)



**Bild 3e**

Luftporenbildung und Verarbeitbarkeit in Abhängigkeit von der Art und Zugabemenge der Fließmittel des Herstellers 2 (Kombination synthetisches Tensid 1/ CEM II-Zement)



**Bild 3f**

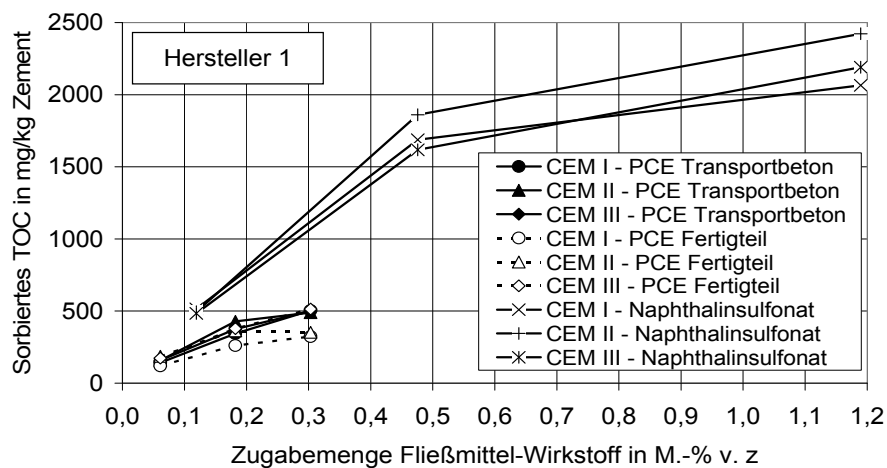
Luftporenbildung und Verarbeitbarkeit in Abhängigkeit von der Art und Zugabemenge der Fließmittel des Herstellers 2 (Kombination synthetisches Tensid 1/ CEM III-Zement)

und einem Fließmittel auf PCE-Basis wiesen eine größere Schwankungsbreite im Luftgehalt auf als Kombinationen mit einem natürlichem LP-Bildner und einem herkömmlichen Fließmittel auf Naphthalin- oder Melaminsulfonat-Basis.

### 3.3 Sorption

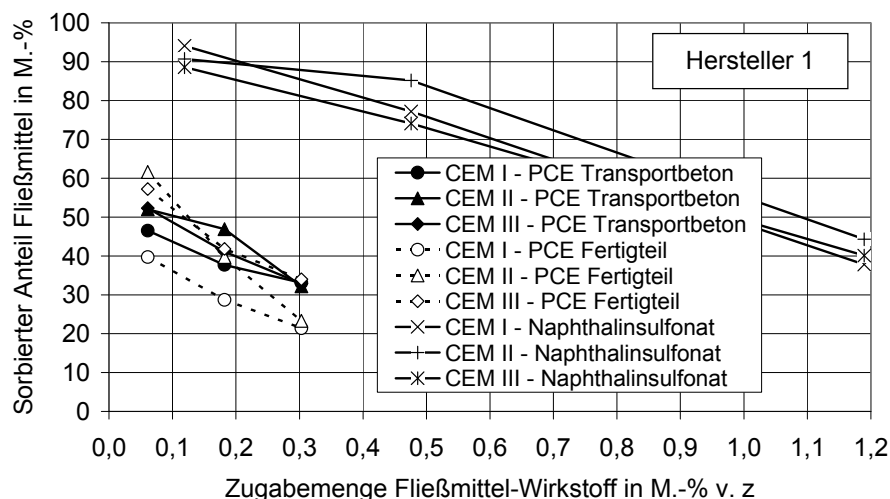
#### 3.3.1 Sorption Fließmittel an Zementpartikel

Die PCE der Hersteller 1 und 2 wurden Zementleim ( $w/z = 1$ ) in Zugabemengen von 0,2; 0,6 und 1,0 M.-% und die herkömmlichen Fließmittel in Zugabemengen von 0,3; 1,2 und 3,0 M.-% v. z. zugegeben. In Bild 4a wurde die sorbierte Menge an TOC in mg/kg Zement in Abhängigkeit des Zements und der Wirkstoff-Zugabemenge des Fließmittels dargestellt (Beispiel Hersteller 1). Zusätzlich wurde in Bild 4b der Prozentanteil des sorbierten Fließmittels bezogen auf die Fließmittel-Zugabemenge (Wirkstoff) dargestellt.



**Bild 4a**

Sorbirtes TOC in Abhängigkeit von der Wirkstoff-Zugabemenge der Fließmittel des Herstellers 1 und des Zements



**Bild 4b**

Prozentanteil des sorbierten Fließmittels bezogen auf das zugegebene Fließmittel in Abhängigkeit des Fließmittels (Hersteller 1) und des Zements

Bei den PCE ist ab Wirkstoff-Zugabemengen von mehr als 0,2 M.-% kaum ein Anstieg an sorbiertem TOC mehr zu verzeichnen. Zusätzlich über diesen Anteil hinaus zugegebenes Fließmittel verbleibt in Lösung. Entsprechend ist ein starker Abfall des sorbierten Fließmittel-Anteils (bezogen auf die Fließmittel-Zugabe) zu verzeichnen. Die herkömmlichen Fließmittel werden auch bei höheren Zugabemengen stärker sorbiert. Dementsprechend fällt der Pro-



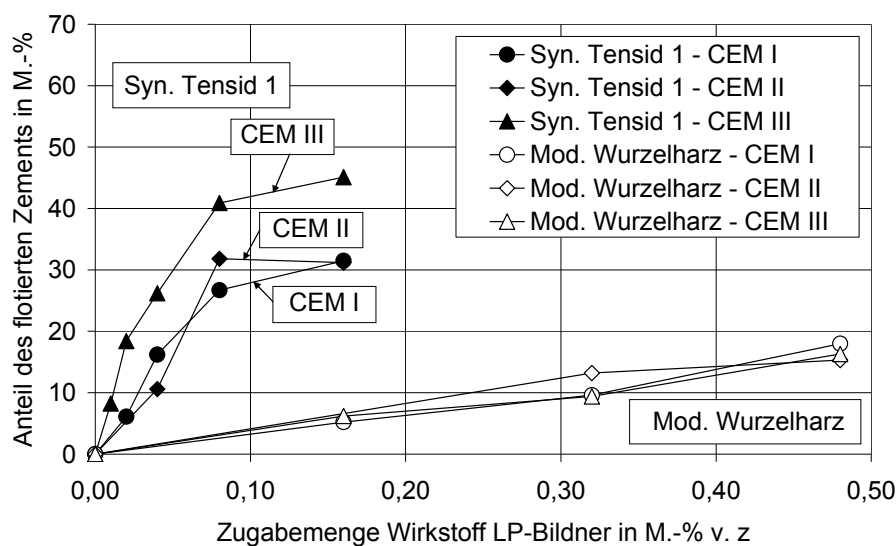
zentanteil des sorbierten Fließmittels nicht so stark wie bei den PCEs ab. Insgesamt wurde nur ein geringer Zementeinfluss gefunden. Dies trifft sowohl für PCE als auch für herkömmliche Fließmittel zu.

### 3.3.2 Flotation

Die Anheftung von Luftblasen an Feststoffpartikel ist Voraussetzung für ein stabiles Luftporengefüge und wurde daher in einem standardisierten Flotationsversuch untersucht. Hierzu wurden in einen Behälter Wasser, Zement und Zusatzmittel gemischt und feine Luftblasen in die Suspension eingebracht. Wenn LP-Bildner-Moleküle an Zementpartikel sorbiert werden, können sich Luftblasen anlagern und mit dem Zement an die Wasseroberfläche steigen. Der entstehende Schaum wurde abgeschöpft und nach dessen Trocknung die Masse des flotierten Zements bestimmt. Das Sorptionsverhalten der LP-Bildner-Moleküle und deren Fähigkeit zur Luftblasenstabilisierung beeinflussen daher die Menge des im Flotationsversuch gewonnenen Zements. Bei einer starken Schaumbildung können sich viele Luftblasen bilden, die in Verbindung mit einer guten Sorptionsfähigkeit auch an Zementpartikel anheften können. Damit wird der Anteil des bis zur Oberfläche aufgestiegenen Zements erhöht.

In einem Referenzversuch wurde zunächst die Flotationsausbeute in Abhängigkeit des Zements und der Zugabemenge des LP-Bidners überprüft (Bild 5). In einer zweiten Versuchsreihe wurde mit dem Fließmitteln des Herstellers 2 untersucht, wie sich eine kombinierte Verwendung von LP und FM auf das Flotationsergebnis auswirkt. Nach Mischen der Suspension wurde zunächst das Fließmittel (Mischzeit eine Minute) und dann der LP-Bidner zugegeben. Danach begann der Flotationszeitraum von zehn Minuten. In orientierenden Versuchen wurde auch zuerst der LP-Bidner und anschließend das Fließmittel zugegeben (Bilder 6a bis 6c).

Mit zunehmender LP-Bidner-Zugabemenge stieg der Anteil an flotiertem Zement bei dem LP-Bidner mit synthetischer Wirkstoffbasis deutlich an, während bei dem IP-Bidner mit natürlicher Wirkstoffbasis nur ein sehr geringer Anstieg zu verzeichnen war (Bild 5). Beim natürlichen LP-Bidner zeigte sich kein Zementeinfluss auf das Flotationsergebnis. Bei dem synthetischen LP-Bidner trat zwischen CEM I und CEM II kein Unterschied auf, während bei Verwendung des CEM III-Zements ein größerer Anteil an flotiertem Zement ermittelt wurde.



**Bild 5**

Anteil des flotierten Zements in M.-% in Abhängigkeit der Wirkstoff-Zugabemenge des LP-Bidners und des Zements

Wenn das Fließmittel zuerst und dann der LP-Bildner zugegeben wurde, war während des Flotationsversuchs im Vergleich zum Versuch mit „Nur LP-Bildner“ augenscheinlich eine stärkere Schaumbildung zu beobachten, wobei der Schaum eine weiße Färbung aufwies. Beim Versuch ohne Fließmittel war die Schaumbildung geringer und der Schaum war grau gefärbt. Wurde zuerst das Fließmittel und dann der LP-Bildner zugegeben, fiel der Anteil an flotiertem Zement beim Fließmittel auf Melaminsulfonatbasis mit zunehmender Fließmittelmenge ab (Bild 6a). Im Gegensatz hierzu war bei geringen PCE-Zugabemengen zunächst ein Anstieg des flotierten Zementanteils zu verzeichnen, bevor bei höheren PCE-Zugabemengen ein Abfall der Flotationsausbeute vergleichbar dem Melaminsulfonat zu verzeichnen war (Bild 6b). Bei Verwendung des CEM III-Zements wurde ein etwas höherer Anteil an flotiertem Zement bestimmt. In einem orientierenden Versuch wurde die Zugabe-Reihenfolge geändert. Wurde zuerst der LP-Bildner und dann das Fließmittel (Fertigteil-PCE) zugegeben, änderte sich das Ergebnis im Vergleich zur umgekehrten Zugabe-Reihenfolge nicht wesentlich (Bild 6 c).

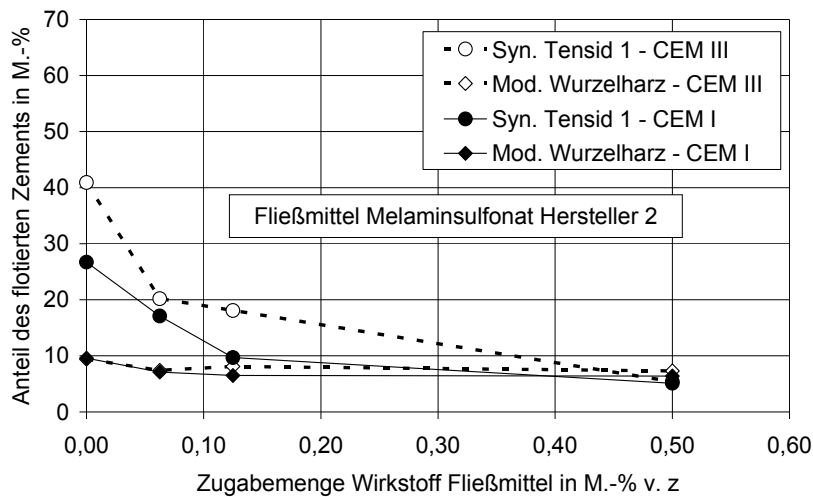
Insgesamt verringerte sich bei höheren Fließmittel-Zugabemengen der Anteil des flotierten Zements. Ursache ist wahrscheinlich, dass das Fließmittel die Sorptionsplätze an den Zementpartikeln belegt. Als Folge können weniger LP-Bildner-Moleküle und weniger Luftblasen am Zement anheften, so dass der Anteil an flotiertem Zement sinkt. Wenn bei einem Praxisbeton die Luftblasen nicht an Feststoffpartikel anheften können, besteht die Gefahr, dass sie während des Verdichtungsvorgangs aus dem Beton entweichen und insgesamt ein instabiles Luftporengefüge entsteht.

### **3.4 Betonuntersuchungen**

#### **3.4.1 Auswahl von Ausgangsstoffkombinationen LP-Bildner/Fließmittel/Zement**

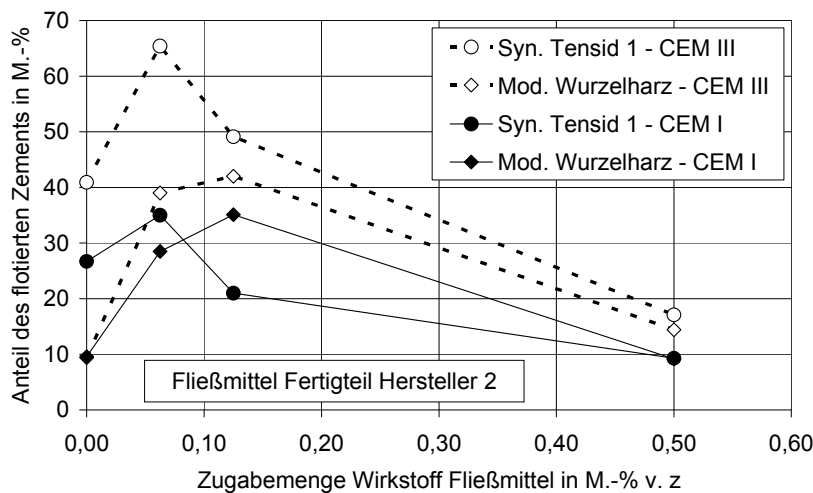
Je nach eingesetzter Kombination von Zement und Zusatzmittel (LP/FM) wurden unterschiedliche Schwankungsbreiten hinsichtlich der Kriterien Schaumbildungsvermögen, Flotationsaustrag und Luftgehalt im Feinbeton festgestellt. Die maßgeblichen Unterschiede wurden durch LP-Bildner und Fließmittel hervorgerufen, die durch den Zement hervorgerufenen Unterschiede waren demgegenüber vergleichsweise gering. Zwischen CEM I- und CEM III-Zement traten Unterschiede auf, die mit CEM II erhaltenen Versuchsergebnisse lagen oft im Bereich des CEM I (z. B. Flotationsuntersuchungen). Für die Betonversuche wurden daher der Portlandzement und der Hochofenzement ausgewählt.

Die Untersuchungen zum Luftgehalt von Feinbetonen wiesen bei Kombinationen eines synthetischen LP-Bidners mit einem Fließmittel auf PCE-Basis eine größere Schwankungsbreite auf als bei Kombinationen eines natürlichen LP-Bidners mit einem herkömmlichen Fließmittel auf Naphthalin- oder Melaminsulfonatbasis. Entsprechend der Schwankungsbreite wurden die Kombinationen als robust (geringere Schwankungsbreite) bzw. weniger robust (größere Schwankungsbreite) eingestuft. Durch die Prüfung von robusten und weniger robusten Varianten sollten Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Ausgangsstoff-Kombinationen sichtbar gemacht und Zusammenhänge hergestellt werden. Diese Einstufung kann nicht verallgemeinert werden. Sie kann jedoch als Grundlage zur weiteren Erfahrungssammlung und als Interpretationshilfe für die Praxis dienen.



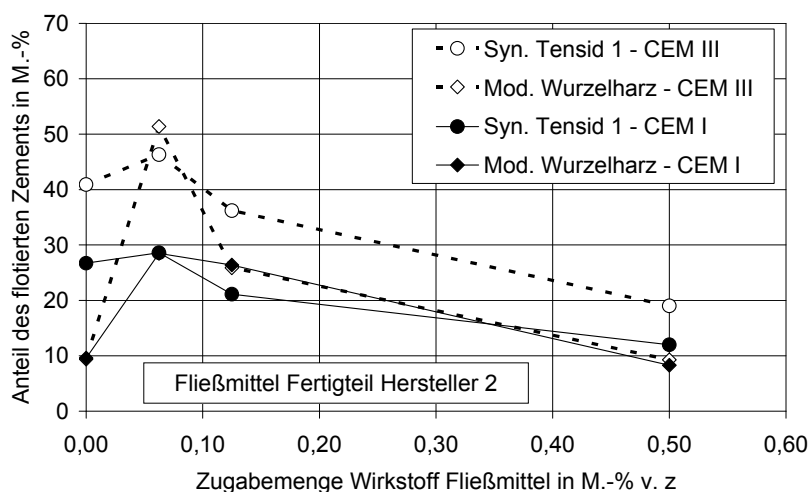
**Bild 6a**

Anteil des flotierten Zements in M.-% in Abhängigkeit der Wirkstoff-Zugabemenge des Melaminsulfonats (Hersteller 2) und des Zements (Reihenfolge erst Fließmittel, dann LP-Bildner)



**Bild 6b**

Anteil des flotierten Zements in M.-% in Abhängigkeit der Wirkstoff-Zugabemenge des PCE-Fertigteils (Hersteller 2) und des Zements (Reihenfolge erst Fließmittel, dann LP-Bildner)



**Bild 6c**

Anteil des flotierten Zements in M.-% in Abhängigkeit der Wirkstoff-Zugabemenge des PCE-Fertigteils (Hersteller 2) und des Zements (Reihenfolge erst LP-Bildner, dann Fließmittel)

Um zu überprüfen, ob die bisherigen Untersuchungsergebnisse auch auf die Verhältnisse eines Betons übertragbar sind, wurden zehn Kombinationen LP/FM/Zement ausgewählt (Tabelle 3). Jeweils vier Betone entfielen auf Zusatzmittelkombinationen mit den beiden PCEs des Herstellers 2 (Fertigteil und Transportbeton) und zwei LP-Bildnern unterschiedlicher Wirkstoffbasis (synthetisch / natürlich) und dem CEM I- bzw. CEM III-Zement. Zur Anknüpfung

fung an den bisherigen Erfahrungsbereich wurde auch das herkömmliche Fließmittel auf Naphthalinsulfonat-Basis in Kombination mit beiden LP-Bildnern, aber nur mit dem CEM III-Zement eingesetzt.

### 3.4.2 Zugabemenge Zusatzmittel in Abhängigkeit der Ausgangsstoffkombination

Die erforderlichen Zugabemengen an LP-Bildner bzw. Fließmittel zur Erzielung eines Luftgehalts von  $(5,5 \pm 0,5)$  Vol.-% bzw. eines Ausbreitmaßes von 49 bis 55 cm 30 Minuten nach Mischende (PCE Fertigteil) bzw. 45 Minuten nach Mischende (PCE Transportbeton bzw. herkömmliches Fließmittel auf Naphthalinsulfonat-Basis) sind in Tabelle 3 aufgeführt. Der synthetische LP-Bildner erwies sich unabhängig von der gewählten Zement/Fließmittel-Kombination als wesentlich wirksamer, insbesondere wenn der Wirkstoffgehalt des LP-Bildners berücksichtigt wurde. Beim natürlichen LP-Bildner waren im Vergleich zum synthetischen Tensid zehnfach höhere Wirkstoffkonzentrationen erforderlich, um den gewünschten Luftgehalt zu erreichen. Beim CEM III-Zement musste bei beiden LP-Bildnern die Zugabemenge erhöht werden. Die Art des PCE beeinflusste die Zugabemenge des LP-Bildners nicht nennenswert, dies galt für beide Zemente. Bei den beiden Betonen mit Naphthalinsulfonat wurden die höchsten Zugabemengen an LP-Bildner benötigt.

Die Wirkstoffbasis des LP-Bildners und die Zementart beeinflussten die erforderliche Fließmittel-Zugabemenge zur Einstellung der gewünschten Konsistenz nicht nennenswert. Beim PCE Fertigteil wurde die geringste und beim Naphthalinsulfonat die höchste Fließmittel-Zugabemenge benötigt. Das PCE Transportbeton lag im mittleren Bereich. Diese Reihenfolge blieb auch unter Berücksichtigung der Wirkstoffgehalte der Fließmittel erhalten. Insgesamt waren bei den Fließmitteln wesentlich höhere Wirkstoff-Zugabemengen notwendig als bei den LP-Bildnern. Das Wirkstoffverhältnis Fließmittel/LP-Bildner schwankte zwischen 3 und 8 (natürlicher LP-Bildner) und 21 und 63 (synthetischer LP-Bildner, Tabelle 3).

**Tabelle 3** Zugabemengen der Zusatzmittel in Abhängigkeit der Ausgangsstoffkombination

Nr.	Zement 42,5 N	Fließmittel			LP-Bildner			Verhältnis Wirkstoff FM/LP
		Typ	Zugabemenge M.-% v. z		Typ	Zugabemenge M.-% v. z		
			FM	Wirkstoff		L	Wirkstoff	
1	CEM I	PCE Fertigteil	0,29	0,084	mod. Wurzelharz	0,075	0,0146	5,8
2			0,25	0,073	Syn. Tensid 1	0,020	0,0016	46
3		PCE Transportbeton	0,50	0,100	mod. Wurzelharz	0,085	0,0165	6,1
4			0,50	0,100	Syn. Tensid 1	0,020	0,0016	63
5	CEM III/A	PCE Fertigteil	0,30	0,087	mod. Wurzelharz	0,165	0,0320	2,7
6			0,29	0,084	Syn. Tensid 1	0,040	0,0032	26
7		PCE Transportbeton	0,55	0,110	mod. Wurzelharz	0,180	0,0350	3,1
8			0,50	0,100	Syn. Tensid 1	0,040	0,0032	31
9		Naphthalinsulfonat	0,80	0,320	mod. Wurzelharz	0,200	0,0388	8,2
10			0,80	0,320	Syn. Tensid 1	0,080	0,0155	21

### 3.4.3 Einfluss der Ausgangsstoffkombination auf Konsistenz und Luftgehalt

#### a) Konsistenz

Der Ausgangsbeton wies nach Einmischen des LP-Bildners und vor der Zugabe des Fließmittels ein Ausbreitmaß von rd. 35 cm auf (Bilder 7a bis 7c). Nach Fließmittel-Zugabe erhöhte sich das Ausbreitmaß auf mehr als 60 cm. Danach stand der Frischbeton bis zum nächsten Prüfzeitpunkt von 10 Minuten abgedeckt im Mischer. Dabei traten Entmischungserscheinungen auf. Um den Beton zu homogenisieren, wurde der Beton vor dem vorgesehenen Prüfzeitpunkt (z.B. 10 Minuten nach Mischende) über einen Zeitraum von 10 Sekunden aufgemischt. Nach längeren Zeiträumen nach Mischende steifte der Beton an und die Entmischungserscheinungen verringerten sich. Das PCE für den Transportbetonbereich und das herkömmlichen Fließmittel auf Naphthalinsulfonat-Basis wirkten länger verflüssigend als das PCE für den Fertigteilbereich. Der Abfall im Ausbreitmaß war bei dem PCE Fertigteil stärker ausgeprägt. Zement- bzw. LP-Bildnerabhängige Unterschiede wurden nicht festgestellt. Die der Auswahl der Fließmittel zugrunde liegenden Annahmen hinsichtlich der Verflüssigungsdauer wurden damit bestätigt.

#### b) Luftgehalt

- Fließmittel auf PCE-Basis (Bilder 7a und 7b)

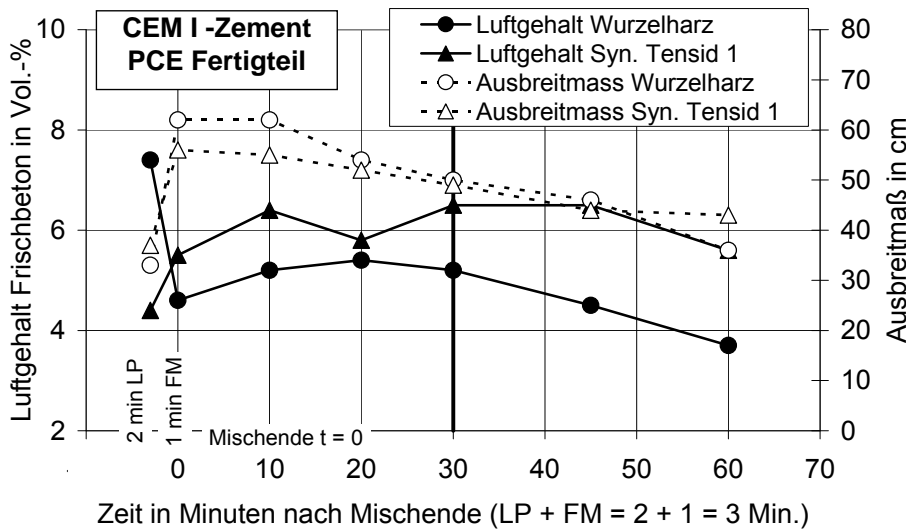
Nach dem Einmischen des LP-Bildners wiesen die Betone mit dem natürlichem LP-Bildner höhere Luftgehalte auf als die Betone mit synthetischem LP-Bildner. Bei dem natürlichem LP-Bildner lag der Luftgehalt mit rd. 7 bis 8 Vol.-% oberhalb des Zielwerts von 5,5 Vol.-% und beim synthetischen LP-Bildner mit rd. 2,5 bis 4,5 Vol.-% unterhalb dieses Wertes. Nach dem einminütigen Einmischen des PCEs (Mischende) zeigte sich bei Einsatz des LP-Bildners mit natürlicher Wirkstoffbasis ein Abfall und beim synthetischen LP-Bildner ein Anstieg des Luftgehalts. Der Abfall fiel beim natürlichen LP-Bildner bei Verwendung des CEM III-Zements geringer aus als beim CEM I-Zement. Der Anstieg beim synthetischen LP-Bildner war beim CEM III-Zement stärker ausgeprägt als beim CEM I-Zement.

- Fließmittel auf Naphthalinsulfonat-Basis (Bild 7c)

Bei den beiden Betonen 9 und 10 mit CEM III-Zement und unterschiedlichen LP-Bildnern wurden vergleichbare Kurvenverläufe festgestellt (Bild 7c). Nach dem zweiminütigen Einmischen lag der gemessene Luftgehalt mit rd. 8 bis 9 Vol.-% oberhalb des Zielwerts von 5,5 Vol.-%. Nach Zugabe des Fließmittels verringerte sich der Luftgehalt mit zunehmendem Frischbetonalter. Ein Einfluss der Wirkstoffart des LP-Bildners wurde im Gegensatz zu den Varianten mit PCE nicht festgestellt.

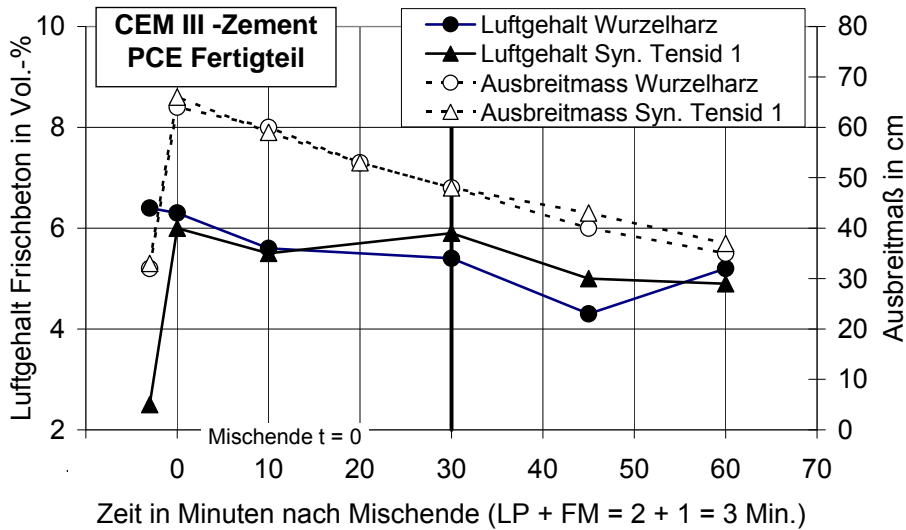
### 3.4.4 Einfluss der Ausgangsstoffkombination auf die Luftporenkennwerte

Entsprechend den Darstellungen zum zeitlichen Verlauf der Frischbetoneigenschaften Luftgehalt und Verarbeitbarkeit wurde der zeitliche Verlauf der Luftporenkennwerte Abstandsfaktor und Mikro-Luftporengehalt in Abhängigkeit der Ausgangsstoffkombination in den Bildern 8a bis 8c dargestellt.



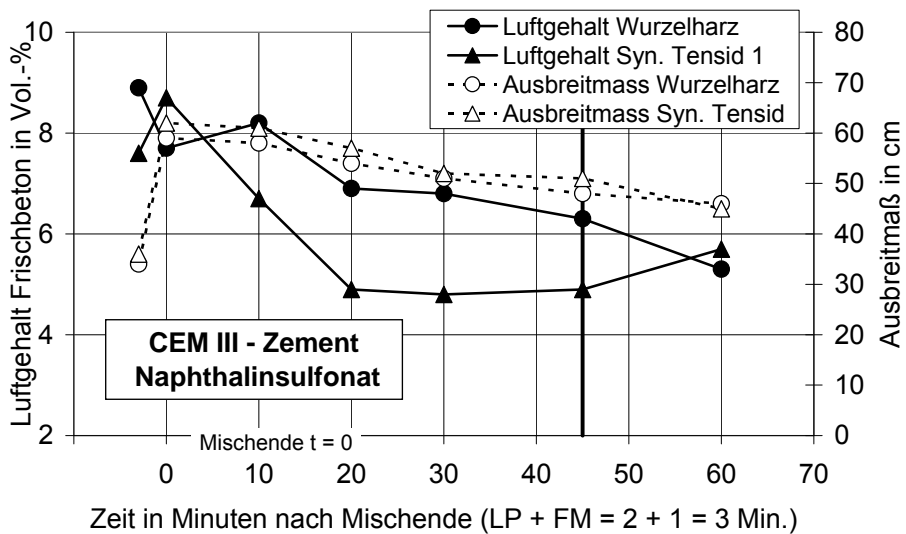
**Bild 7a**

Zeitlicher Verlauf der Frischbetoneigenschaften in Abhängigkeit des LP-Bildners: Variante PCE-Fertigteil (Hersteller 2) und CEM I-Zement



**Bild 7b**

Zeitlicher Verlauf der Frischbetoneigenschaften in Abhängigkeit des LP-Bildners: Variante PCE-Fertigteil (Hersteller 2) und CEM III-Zement



**Bild 7c**

Zeitlicher Verlauf der Frischbetoneigenschaften in Abhängigkeit des LP-Bildners: Variante Fließmittel auf Naphthalinsulfonatbasis (Hersteller 1) und CEM III-Zement

Der zeitliche Verlauf der LP-Kennwerte unterschied sich in Abhängigkeit der Ausgangsstoffkombination. Die beiden PCEs aus den Bereichen Transportbeton und Fertigteil wiesen ähnliche Kurvenverläufe auf. Wie bereits beim Luftgehalt, unterschieden sich die Betone mit Naphthalinsulfonat von den Betonen mit PCE.

#### a) Fließmittel auf PCE-Basis (Bilder 8a und 8b)

Nach dem Einmischen des LP-Bildners wurde bei den Betonen mit natürlichem LP-Bildner ein feineres Luftporensystem (geringere Abstandsfaktoren und höherer Mikro-Luftporengehalt) festgestellt als bei den Betonen mit synthetischem LP-Bildner (höherer Abstandsfaktoren und geringerer Mikro-Luftporengehalt). Dies entsprach auch dem Gesamtluftgehalt, der zu diesem Zeitpunkt bei Betonen mit natürlichem LP-Bildner höher und bei Betonen mit synthetischem LP-Bildner niedriger war (Bilder 7a und 7b). Nach dem Einmischen des Fließmittels wurde bei den Betonen mit natürlichem LP-Bildner eine Vergrößerung des Luftporensystems (höhere Abstandsfaktoren und geringere Mikro-Luftporengehalte) und bei den Betonen mit synthetischem Tensid eine Verfeinerung des Luftporensystems (geringere Abstandsfaktoren und höhere Mikro-Luftporengehalte) festgestellt. Dies entsprach dem zeitlichen Verlauf des Luftgehalts, wo nach dem Einmischen des PCEs beim natürlichen LP-Bildner ein Abfall und beim synthetischen LP-Bildner ein Anstieg des Luftgehalts bestimmt wurde. Im Zeitraum zwischen Mischende (nach Einmischen des Fließmittels) und 60 Minuten nach Mischende war keine eindeutige Tendenz festzustellen. Bei Betonen mit synthetischem LP-Bildner wurden bei Verwendung des PCE-Fertigteil etwas günstigere LP-Kennwerte gefunden.

#### b) Fließmittel auf Naphthalinsulfonat-Basis (Bild 8c)

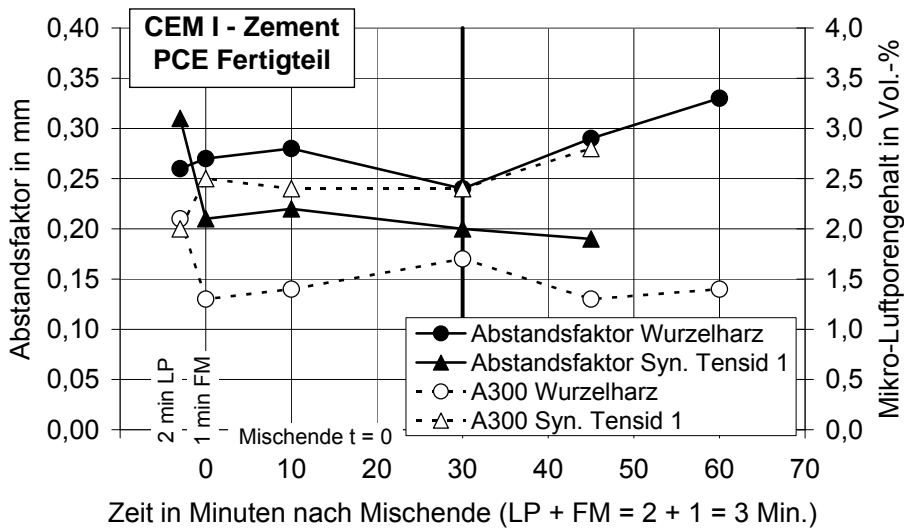
Im Gegensatz zu den Betonen mit PCE war kein ausgeprägter Einfluss des LP-Bildners feststellbar (Bild 8c). Mit zunehmender Zeitdauer nach Mischende wurden die LP-Kennwerte ungünstiger, der Abstandsfaktor vergrößerte und der Mikro-Luftporengehalt verringerte sich. Der Luftgehalt insgesamt fiel auch ab. Das bedeutet, dass mit zunehmendem Frischebetonalter sowohl immer mehr kleine Luftporen (Verschlechterung der LP-Kennwerte) als auch mehr große Luftporen (Verringerung des Gesamtluftgehalts) aus dem Frischbeton verschwanden.

#### c) Vergleich der LP-Kennwerte mit den Anforderungen

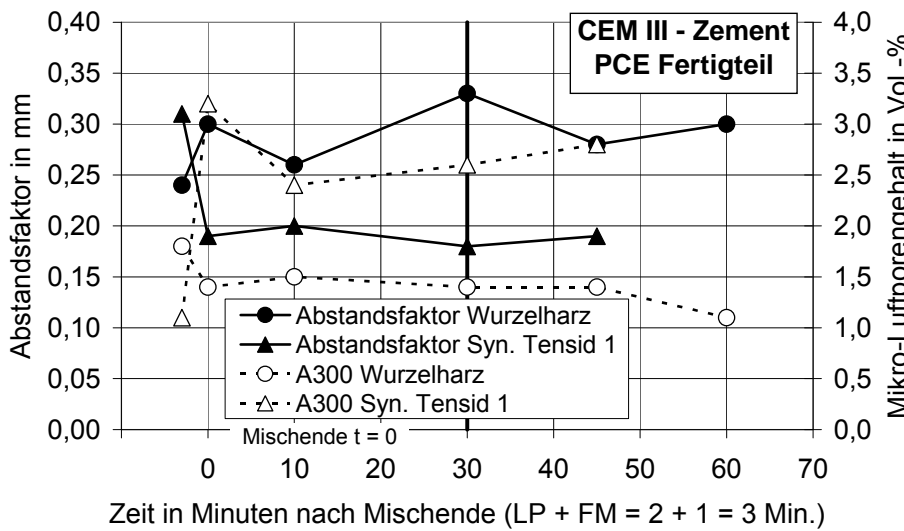
Je nach geforderter Prüfung (Erst-, Wirksamkeits- bzw. Bauteilprüfung) müssen die in Tabelle 4 aufgeführten Anforderungen an die LP-Kennwerte eingehalten werden. Nach 30 bzw. 45 Minuten wies der Beton die gewünschte Konsistenz und der Luftgehalt i. d. R. den gewünschten Zielwert zwischen 5 und 6 Vol.-% auf. Die zu diesen Zeitpunkten ermittelten LP-Kennwerte sind für jeden der zehn Betone in Tabelle 5 zusammengestellt.

**Tabelle 4** Anforderungen an die Luftporenkennwerte in Abhängigkeit der Prüfung

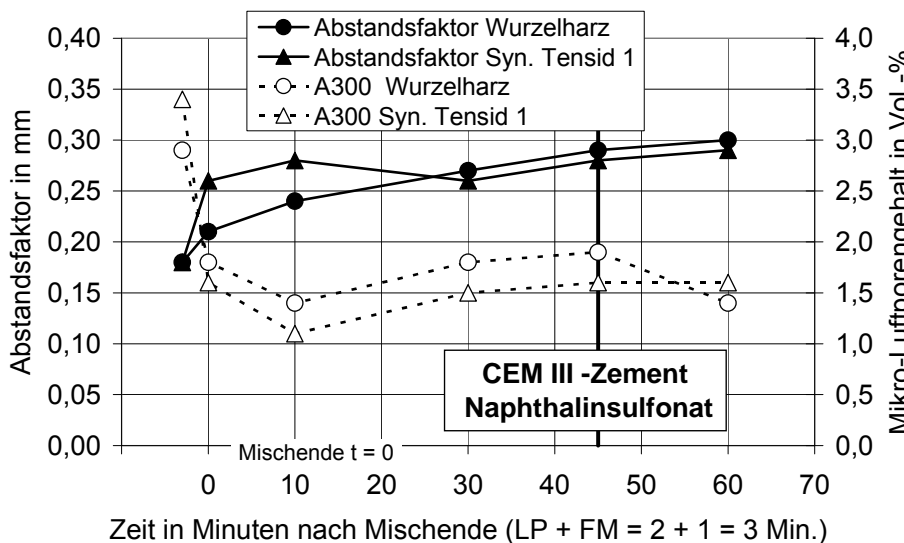
Art der Prüfung	Anforderung an	
	Abstandsfaktor in mm	Mikro-Luftporengehalt in Vol.-%
Erstprüfung	0,20	1,8
Wirksamkeitsprüfung	0,20	1,5
Bauteilprüfung	0,24	1,5



**Bild 8a**  
Zeitlicher Verlauf der LP-Kennwerte in Abhängigkeit des LP-Bildners: Variante PCE-Fertigteil (Hersteller 2) und CEM I-Zement



**Bild 8b**  
Zeitlicher Verlauf der LP-Kennwerte in Abhängigkeit des LP-Bildners: Variante PCE-Fertigteil (Hersteller 2) und CEM III-Zement



**Bild 8c**  
Zeitlicher Verlauf der LP-Kennwerte in Abhängigkeit des LP-Bildners: Variante PCE-Fertigteil (Hersteller 2) und CEM III-Zement



Bei den Kombinationen mit dem Fertigteil-PCE wiesen die Betone mit synthetischem LP-Bildner günstigere LP-Kennwerte auf (Tabelle 5). Bei den Betonen mit dem Transportbeton-PCE bzw. dem Naphthalinsulfonat war keine eindeutige Tendenz zu erkennen. Trotz eines anforderungsgerechten Gesamtluftgehalts der Betone wurden die Anforderungen an die LP-Kennwerte für eine Erstprüfung bei einigen Mischungen nicht eingehalten. Ursache ist nicht eine entschäumende Wirkung bei bestimmten LP-Bildner/Fließmittel-Kombinationen, sondern die Konsistenz des Betons. Unmittelbar nach Einmischen des Fließmittels musste eine fließfähige Konsistenz (Konsistenzklasse F5, Ausbreitmaß 58 bis 62 cm) eingestellt werden, um nach 30 bzw. 45 Minuten die angestrebte sehr weiche Konsistenz (Konsistenzklasse F4, Ausbreitmaß 49 bis 55 cm) zu erreichen. Das Luftporensystem wurde daher in einem Beton mit fließfähiger Konsistenz gebildet. Erfahrungsgemäß erschwert dies die Ausbildung eines anforderungsgerechten Luftporensystems.

**Tabelle 5** LP-Kennwerte in Abhängigkeit der Ausgangsstoffkombination (30 bzw. 45 Min. nach Mischende)

Nr	Zement	Zusatzmittel		LP-Kennwerte		Luftgehalt am Festbeton
				Mikro-Luftporengehalt	Abstandsfaktor	
		Fließmittel	LP-Bildner	mm	mm	Vol.-%
1	CEM I	PCE Fertigteil	mod. Wurzelharz	1,7	0,24	7,0
2			Syn. Tensid 1	2,4	0,20	7,1
3		PCE Transportbeton	mod. Wurzelharz	1,8	0,24	6,4
4			Syn. Tensid 1	1,5	0,26	6,8
5	CEM III/A	PCE Fertigteil	mod. Wurzelharz	1,4	0,33	6,6
6			Syn. Tensid 1	2,6	0,18	7,5
7		PCE Transportbeton	mod. Wurzelharz	1,3	0,31	5,0
8			Syn. Tensid 1	1,6	0,29	6,0
9		Naphthalinsulfonat	mod. Wurzelharz	1,9	0,29	6,7
10			Syn. Tensid 1	1,6	0,28	6,4

#### 4 Zusammenfassung und Bewertung

Im Forschungsinstitut der Zementindustrie wurden die Wechselwirkungen unterschiedlicher Kombinationen LP-Bildner/Fließmittel/Zement auf die Luftporenbildung untersucht. Das Forschungsvorhaben wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

In dem Forschungsvorhaben sollte gezeigt werden, welche Wirkungsgruppen von LP-Bildnern (synthetische bzw. natürliche Wirkstoffbasis) bzw. Spezifikationen der Fließmittel (PCE, Fließmittel auf Melamin- bzw. Naphthalinsulfonatbasis) die Luftporen- bzw. Schaumbildung in Kombination mit dem Zement beeinflussen. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens sollten den bisherigen Kenntnisstand über Wirkungsmechanismen und Wechselwirkungen bei gemeinsamer Verwendung von Fließmittel und LP-Bildner erweitern.

In dem Forschungsvorhaben wurde die Schaumbildung an Zementsuspensionen bzw. Feinbetonen sowie das Sorptionsverhalten in Flotationsversuchen und an Zementleimen untersucht. An ausgewählten Betonen wurde der Einfluss der Kombination LP-Bildner/Fließmittel/Zement auf die Luftporenbildung des Frisch- und Festbetons ermittelt.

Bei der Schaumbildung erwiesen sich die Wirkstoffbasis des LP-Bildners und die Zugabereihenfolge als maßgeblicher Parameter. Der gut lösliche synthetische LP-Bildner bildete wesentlich mehr Schaum als der LP-Bildner auf natürlicher Wirkstoffbasis, der zum großen Anteil in der Porenlösung ausfiel. Die Zementart beeinflusste die Schaumbildung kaum. Die Zugabereihenfolge der Zusatzmittel wirkte sich stark auf die Schaumbildung aus. Wurde zuerst das Fließmittel und dann der LP-Bildner zugegeben, war die Schaumbildung effektiver. Das Fließmittel wurde sorbiert. Da die Sorptionsplätze bereits belegt sind, wird nachträglich zugegebener LP-Bildner zu einem geringeren Anteil sorbiert als bei umgekehrter Zugabereihenfolge (Erst LP, dann FM). Somit verbleibt ein größerer Anteil LP-Bildner in der Porenlösung und kann Luftblasen stabilisieren, so dass sich vermehrt Schaum bildet. Ein ähnliches Ergebnis zeigte sich in den Flotationsversuchen. Bei hohen Fließmittelzugaben wurde zwar Schaum gebildet, das Flotationsergebnis konnte aber nicht gesteigert werden, da die Luftblasen nicht mehr an Zementpartikel anheften konnten. Wichtig für die Stabilität des Luftporengefüges eines Praxisbetons ist, dass die beim Mischen erzeugten Luftporen an Feststoffpartikel anhaften. Sie können sich dann auch bei intensiver Verdichtungsenergie nicht ablösen und zu größeren Luftporen zusammenschließen, die durch den größeren Auftrieb aus dem Beton entweichen könnten. Nach dem Erhärten verbleiben die gebildeten Luftblasen als kugelige Luftporen im Beton. Für die Herstellung von Betonen in der Praxis sollte daher die Reihenfolge „erst LP-Bildner und dann Zugabe des Fließmittels“ gewählt werden. Dies hat den Vorteil, dass das Luftporensystem in einem steiferen Beton gebildet werden kann, womit erfahrungsgemäß bei gleichem Gesamtluftgehalt ein günstigeres Luftporensystem mit mehr kleinen Poren verbunden ist.

Bei der Luftporenbildung im Feinbeton überwog vergleichbar der Schaumbildung der Einfluss der Zusatzmittelkombination und der Zugabereihenfolge.

Bei den Flotations- und Sorptionsversuchen erwies sich der Zusatzmitteleinfluss als maßgeblich, der Zementeinfluss war eher gering. Es zeigte sich, dass bei hohen Fließmittelzugaben der Flotationsaustrag abfiel, obwohl im Versuch eine starke Schaumbildung zu beobachten war. Dies deutet ebenfalls darauf hin, dass die gebildeten Luftblasen nicht an Feststoffpartikel anheften können (siehe oben).

In Abhängigkeit der eingesetzten Kombination von Zement und Zusatzmittel (LP/FM) sowie sonstiger untersuchter Randbedingungen wurde ein unterschiedliches Verhalten hinsichtlich der Schwerpunkte Schaumbildung in Zementsuspension, Luftporenbildung in Feinbeton sowie Flotationsaustrag und Sorption festgestellt. Die maßgeblichen Unterschiede wurden durch LP-Bildner und Fließmittel hervorgerufen, die durch den Zement hervorgerufenen Unterschiede waren vergleichsweise gering.

Für die Betonversuche wurden der Portlandzement und der Hochofenzement ausgewählt und der Einfluss der Ausgangsstoffkombination und des Frischbetonalters auf den Luftgehalt und die LP-Kennwerte untersucht. Zunächst wurde die erforderliche Zugabemenge an LP-Bildner und Fließmittel festgelegt, um den geplanten Luftgehalt und die gewünschte Verarbeitbarkeit zu erreichen.

Bei den LP-Bildnern erwies sich der synthetische LP-Bildner unabhängig von der gewählten Zement/Fließmittel-Kombination als wesentlich wirksamer. Beim CEM III-Zement musste die Zugabemenge im Vergleich zum CEM I-Zement erhöht werden. Die Art des PCEs beeinflusste die Zugabemenge des LP-Bildners nicht nennenswert, dies galt für beide Zemente. Bei Betonen mit Naphthalinsulfonat wurden die höchsten Zugabemengen an LP-Bildner benötigt. Die erforderliche Fließmittel-Zugabemenge zur Einstellung der gewünschten Konsistenz wurde durch die Wirkstoffbasis des LP-Bildners und die Zementart nicht nennenswert beeinflusst. Beim PCE Fertigteil wurde die geringste und beim Naphthalinsulfonat die höchste Fließmittel-Zugabemenge benötigt. Das PCE Transportbeton lag im mittleren Bereich. Der zeitliche Verlauf der Luftporenbildung (Frisch- und Festbeton) wurde nach dem Einmischen des LP-Bildners, nach der Fließmittel-Zugabe und anschließend nach Zeiträumen von 10, 30, 45 und 60 Minuten nach Mischende ermittelt. Die Betone mit den PCEs aus den Bereichen Transportbeton und Fertigteil zeigten ähnliche Kurvenverläufe. Nach dem einminütigen Einmischen des PCEs (Mischende) wurde bei Einsatz des LP-Bildners mit natürlicher Wirkstoffbasis ein Abfall des Luftgehalts in Kombination mit einer Verschlechterung der LP-Kennwerte und beim synthetischen LP-Bildner ein Anstieg des Luftgehalts und eine Verbesserung der LP-Kennwerte festgestellt. Der Abfall des Luftgehalts fiel beim natürlichen LP-Bildner bei Verwendung des CEM III-Zements geringer aus als beim CEM I-Zement. Der Anstieg beim synthetischen LP-Bildner war beim CEM III-Zement stärker ausgeprägt als beim CEM I-Zement. Bei Verwendung des Naphthalinsulfonats verringerten sich nach Zugabe des Fließmittels unabhängig von der Wirkstoffart des LP-Bildners die Luftgehalte und verschlechterten sich die LP-Kennwerte. Die gewählte Zusatzmittelkombination FM/LP bestimmte die Luftporenbildung maßgeblich.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Zugabereihenfolge der Zusatzmittel und die Zusatzmittelkombination LP/FM die Luftporenbildung entscheidend beeinflussen, der Zement ist nicht von so großer Bedeutung. Bei Verwendung von LP-Bildnern auf synthetischer Wirkstoffbasis sind wegen der guten Löslichkeit größere Schwankungen des Luftgehalts zu erwarten, wenn sich Randbedingungen ändern (z. B. Mischzeit, Zugabereihenfolge). Zusatzmittelkombinationen LP/FM mit LP-Bildnern mit natürlicher Wirkstoffbasis weisen demgegenüber geringere Schwankungen des Luftgehalts auf. Sie sind daher als „robuster“ zu bezeichnen im Vergleich zu Zusatzmittelkombinationen mit synthetischen LP-Bildnern.

Aus den Versuchsergebnissen wurden abschließend Empfehlungen für die bauausführende Industrie sowie die Hersteller der Zusatzmittel und der Mischanlagen abgeleitet.

#### a) Hersteller des Luftporenbetons: Bauindustrie oder Transportbetonwerke

Die Zugabereihenfolge von LP-Bildner und Fließmittel beeinflusst bei Annahme gleichbleibender Zusatzmittelmengen entscheidend die Luftporenbildung. Bei der Herstellung des LP-Betons in der Praxis ist darauf zu achten, dass die einmal gewählte Mischreihenfolge und Mischdauer exakt eingehalten wird. Der LP-Bildner sollte zuerst und anschließend das Fließmittel zugegeben werden.

Bei Änderungen der LP-Bildnermenge (Überdosierung) und der Mischreihenfolge sind insbesondere bei LP-Bildnern mit synthetischer Wirkstoffbasis infolge der guten Löslichkeit größere Auswirkungen zu erwarten. LP-Bildner mit natürlicher Wirkstoffbasis hingegen fallen zu einem großen Anteil in der Porenlösung aus, daher haben die o. g. Einflüsse (z. B. Überdosierung) entsprechend geringere Auswirkungen zur Folge. Wenn bei Verwendung syntheti-

scher LP-Bildner während des Transports in Fahrmischern mit drehender Trommel dem Frischbeton nachträglich Mischenergie zugeführt wird, kann gelöster LP-Bildner aktiviert werden und der Luftgehalt ansteigen. Möglicherweise wird andererseits aber auch infolge der weichen Konsistenz mehr Luft ausgetrieben. Die nachträgliche Erhöhung des Luftgehalts kann auch während des Einbaus z. B. durch Förderschnecken auftreten.

Zusatzmittelkombinationen LP/FM mit LP-Bildnern mit natürlicher Wirkstoffbasis sind daher als „robuster“ zu bezeichnen als Zusatzmittelkombinationen mit synthetischen LP-Bildnern.

#### b) Zusatzmittelindustrie

LP-Bildner mit natürlicher Wirkstoffbasis führen zu geringeren Schwankungen im Gesamtluftgehalt und neigen weniger zum Nachaktivieren. Andererseits ist es oft schwierig, den Luftgehalt anzuheben. Möglicherweise lässt sich dieser Nachteil durch eine synthetische Wirkstoffkomponente ausgleichen. LP-Bildner-Gemische aus synthetischen und natürlichen Wirkstoffen könnten bei der gemeinsamen Verwendung mit Fließmitteln die Luftporenbildung erleichtern, ohne das Nachaktivierungspotenzial nennenswert zu steigern.

#### c) Baumaschinenindustrie

Die LP-Bildner sollten nach kurzer Mischzeit vollständig aktiviert werden. Bei der kombinierten Zugabe von LP-Bildner und Fließmittel sollten die Mischanlagen mit zwei Zusatzmitteldosiereinrichtungen ausgestattet sein. Die Steuerungsprogramme der Mischanlagen sollten so ausgelegt sein, dass die Dosiereinrichtungen unabhängig voneinander vom Mischerführer bedient werden können. Dabei sollte auch der Zugabezeitpunkt frei wählbar sein.

**Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.** Die Ergebnisse zeigen, dass bei Verwendung geeigneter Betonzusammensetzungen und einer sachgerechten Herstellung des Luftporenbetons das gewünschte anforderungsgerechte Luftporensystem auch unter den besonderen Bedingungen der gemeinsamen Verwendung von LP-Bildnern und Fließmitteln gewährleistet werden kann.