

# **Rheometrische Mischprozessführung**

**Intensiv-Konus-Mischer mit integriertem Rheometer zur  
Herstellung von Hochleistungsbeton mit definierten rheologischen Eigenschaften**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**DOKTOR-INGENIEURS**

vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie  
der Technischen Universität Darmstadt

genehmigte

**DISSERTATION**

von

**Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. (FH) Christian Baumert**

aus Burgsteinfurt

Darmstadt 2012

**D 17**

Hauptreferent:	Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Thomas A. Bier
Tag der Einreichung:	18.01.2012
Tag der mündlichen Prüfung:	26.04.2012

# Kurzfassung

Die stoffliche Zusammensetzung von Hochleistungsbeton bedingt höhere Anforderungen an die Mischtechnik. Konventionelle Mischer zur Herstellung von Normalbeton erreichen die möglichen Frischbetoneigenschaften entweder nicht oder nur nach sehr langer Mischzeit. Die Forderung nach sehr fließfähigen Hochleistungsbetonen, mit nur geringfügig schwankenden rheologischen Eigenschaften, ist in der Praxis gegenwärtig häufig nicht umsetzbar.

Da in der laufenden Produktion weder standardisierte Prüfverfahren noch Beton-Rheometer geeignet erscheinen, muss die rheologische Bewertung im Mischer selbst erfolgen. Die seit Jahrzehnten bei Normalbeton praktizierte Auswertung der Energieaufnahme der Antriebsmotoren während des Mischvorgangs ist bei Hochleistungsbetonen mit selbstverdichtenden Eigenschaften ungeeignet. Das System Viscoprobe™ arbeitet unabhängig vom Mischerantrieb, stellt aber eine zusätzliche Baugruppe dar und kann lediglich die Fließkurve ermitteln.

Ausgehend von der Forderung nach einem Intensiv-Mischer, der ermöglicht, auch rheologische Parameter zu bestimmen, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Konus-Labor-Mischer KKM-R 30 eingesetzt, der ein Nennvolumen von 30 Litern aufweist. Dazu wurden die Antriebstechnik, die Mischwerkzeuge und die Mischprozessführung neu konzipiert und die erforderliche Software entwickelt. Trotz der Steigerung des Leistungsumfanges konnte die Anzahl der verbauten Komponenten gegenüber dem Seriengerät reduziert werden. Durch den Einsatz eines High-Torque-Motors kann das innere Mischwerkzeug, welches über einen großen Abstand zur Mischerwandung verfügt, direkt angetrieben werden. Der Betrieb des Motors erfolgt mit einem Frequenzumrichter, der nach dem Direct-Torque-Regelverfahren arbeitet. Damit wird neben der kontrollierten Beschleunigung des Mischwerkzeugs aus dem Stillstand auch der Betrieb bei niedrigsten Drehzahlen ermöglicht. Durch die hohe Steifigkeit des Antriebsstranges und dessen geringe Masse können zudem die aus der Rheometrie bekannten oszillierenden Messungen durchgeführt werden. Um die Mischleistung zu erhöhen, wurde die Maximaldrehzahl von 180 UPM beim Seriengerät auf 1000 UPM gesteigert. Durch die zusätzlich montierten Stifte an den Außenkanten der Mischpaddel kann ein höherer Anteil der Motorleistung in das Mischgut eingebracht und die Mischdauer verkürzt werden.

Die Mischversuche wurden mit einem Beton mit einem sehr hohen Gehalt an Flugasche und einem sehr niedrigen w/b-Wert durchgeführt. Als besonders vorteilhaft haben sich zweistufige Mischregime erwiesen, deren ersten Stufe dazu dient, bei hohen Werkzeuggeschwindigkeiten den Mörtel herzustellen. In der zweiten Stufe wird bei abgesenkter Werkzeuggeschwindigkeit die Gesteinskörnung zwischen 2 mm und 16 mm zugegeben und für kurze Zeit dem bereits homogenisierten Mörtel untergemischt. Die so hergestellten Betone verfügen über eine geringe plastische Viskosität und benötigen für die Herstellung nur einen geringen Einsatz an elektrischer Energie. Deutliche Vorteile zeigen sich auch bei einer verzögerten Zugabe von 40 Prozent der Fließmittelmenge kurz vor Ende der ersten Mischstufe.

Die mit dem KKM-R 30 ermittelten rheologischen Parameter konnten durch ein Beton-Rheometer und einen modifizierten Frischbetonversuch bestätigt werden. Mit dem modifizierten Mischer können folglich Abweichungen der Fließeigenschaften einzelner Chargen von der Referenz erkannt werden. Durch die gezielte Nachdosierung von Zusatzmitteln oder Zusatzstoffen kann der Abweichung vom Referenzverlauf begegnet werden. Die Schwankungsbreite der rheologischen Eigenschaften kann damit in der laufenden Produktion vermindert werden.

# Abstract

The material composition of high-performance concrete results in higher requirements for the mixing technique. Conventional mixers for the production of normal concrete achieve the possible fresh concrete properties either not or only after a very long mixing time. The demand for very fluid high-performance concrete, wherein the rheological properties fluctuate only slightly, exacerbates the situation.

In the continuous production standard test methods and concrete rheometers are not suitable. The rheological evaluation of the concrete must therefore be carried out in the mixer. The evaluation of the energy consumption of the electric motors during the mixing process is inappropriate for high-performance concretes with self-compacting properties. The Visco Probe <sup>TM</sup> system works independently of the mixer drive, but it places an additional module and can only determine the flow curve.

For the present work, the laboratory-cone mixer KKM-R 30 was designed and the necessary software was developed. This intensive mixer, with a nominal capacity of 30 liters, allows the determination of rheological parameters. Despite the increase in the scope of performance, the number of used components was reduced, compared to the serial mixer. By using a high-torque motor, the internal agitator, which has a large distance from the vessel, is driven directly. The motor is powered with a frequency inverter, which operates on the direct torque control method. Thus, the controlled acceleration of the agitator from a standstill and the operation at very low speeds is possible. In addition, oscillatory measurements are possible by the high stiffness and low mass of the drivetrain.

To increase the mixing performance, the maximum speed of 180 rpm of the serial mixer was increased to 1000 rpm. With additionally mounted pins on the outer edges of the mixing paddle, a higher proportion of the engine power is introduced into the mixture and the mixing time can be shortened.

The mixing experiments were performed with a concrete with a very high content of fly ash and a very low w/b-ratio. Particularly advantageous are two-stage mixing regimes, in which the mortar was prepared with high agitator speeds in the first stage. In the second stage at lower agitator speed, the coarse aggregate between 2 mm and 16 mm, was added. This concrete has the lowest plastic viscosity and requires the least amount of electrical energy for production. Significant advantages were also gained by the delayed addition of 40 per cent of the amount of plasticizer, just before the end of the first stage.

The rheological parameters obtained with the KKM-R 30 were confirmed by a concrete rheometer and a modified fresh concrete test. Deviations of the flow properties of individual batches from the reference, are detected with the modified mixer. The deviation from the reference curve can be counteracted by specific dosing of additives or adjuvants. The variation of the rheological properties can thus be reduced in the continuous production.

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen des Instituts für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt.

Meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht danke ich sehr herzlich für die fachliche Betreuung, das mir entgegengebrachte Vertrauen und den mir eingeräumten Freiraum, bei der technischen Umsetzungen meiner zahlreichen Fortentwicklungen im Bereich der Mischtechnologie.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas A. Bier von der Technischen Universität Bergakademie Freiberg danke ich sehr für sein Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Uwe Schwarz, technischer Mitarbeiter der Prüf- und Versuchsanstalt des Instituts für Massivbau der TU Darmstadt, für die stets schnelle Umsetzung von Sonderlösungen.

Mein weiterer Dank gilt den Sekretärinnen des Fachgebiets Werkstoffe im Bauwesen, Frau Stefanie B. Schmahl und Frau Aysen Cevik.

Für die angenehme Zusammenarbeit möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Alexander Kniele und Herrn Dipl.-Ing. Harald Kniele von der Kniele Mischtechnik GmbH danken.

Ganz besonders bedanke ich mich bei meiner Frau Alexandra Janina für ihre Liebe, Unterstützung und ihr großes Verständnis für meine häufige Abwesenheit.

Darmstadt, Januar 2012

Christian Baumert

## WERDEGANG

Geboren am 26.03.1974 in Burgsteinfurt. Von 1997-2001 Studium des Bauingenieurwesens an der Fachhochschule Münster mit der Vertiefung Verkehrsplanung. Nach einer zweijährigen Tätigkeit in der Bauplanung Studium des Bauingenieurwesens an der TU Braunschweig von 2003-2006 mit konstruktiver Vertiefung. Von 2007-2012 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen an der Technischen Universität Darmstadt. Ab 2012 als Gruppenleiter Frischbeton und Technologieentwicklung am Institut Werkstoffe im Bauwesen (IWB) der Universität Stuttgart tätig.

„Bedenke immer, was  
im großen Ganzen die  
beste Lösung ist, anstatt  
im Kleinen zu denken.“

(Soichiro Honda)

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Ausgangslage.....	1
1.2	Zielsetzung.....	2
1.3	Vorgehensweise.....	2
<b>2</b>	<b>Literatursichtung</b> .....	<b>4</b>
2.1	Mischen.....	4
2.1.1	Mischgutbewegungen und Mischgüte.....	4
2.1.2	Froude-Zahl und Werkzeuggeschwindigkeit.....	9
2.1.3	Mischtechnik zur Herstellung von Normalbeton.....	11
2.1.4	Anforderungen an die Mischtechnik zur Herstellung von Hochleistungsbeton ...	12
2.1.5	Anpassung der Mischtechnik an Hochleistungsbeton.....	12
2.1.6	Intensiv-Mischer.....	13
2.1.7	Suspensions-Mischer.....	14
2.1.8	Mischtechnik in anderen Anwendungen.....	15
2.2	Rheologie von Beton.....	15
2.2.1	Rheologische Modelle.....	15
2.2.2	Rheometer.....	27
2.2.3	Frischbetonversuche.....	29
2.2.4	Einfluss der Mischtechnik auf die Rheologie von Beton.....	30
2.2.5	Einfluss des Mischregimes auf die Rheologie von Beton.....	31
2.2.6	Fließmittel .....	33
2.3	Erfassung rheologischer Parameter im Mischer .....	35
2.3.1	Drehmoment-Sensor.....	35
2.3.2	Drehmoment-Erfassung mit Frequenzumrichter.....	37
2.3.3	Viscoprobe.....	38
<b>3</b>	<b>Anforderungsprofil an den Labor-Mischer</b> .....	<b>40</b>
3.1	Mischtechnik.....	40
3.2	Dosiereinrichtung.....	40
3.3	Rheologische Bewertung im Mischer.....	41
<b>4</b>	<b>Umsetzung im Labor-Mischer KKM-R 30</b> .....	<b>42</b>
4.1	Baugruppen eines Mixers.....	42
4.2	Steuerung der Mischanlage (Baugruppe 1).....	43
4.3	Drehzahl-Regelung (Baugruppe 2).....	52
4.4	Antrieb und Untersetzung (Baugruppen 3 und 4).....	59
4.5	Mischwerkzeug (Baugruppe 5).....	61
4.6	Dosiereinrichtung.....	62
<b>5</b>	<b>Experimentelle Verfahren</b> .....	<b>64</b>
5.1	LCPC Box.....	64
5.2	Rheometer ICAR RHM-3000.....	67
5.3	Bestimmung des Erstarrungsendes mit BEUS (Beton und Ultraschall).....	70
5.4	BétonLAB Pro .....	72
<b>6</b>	<b>Voruntersuchungen und Erstellung des Versuchsprogramms</b> .....	<b>74</b>
6.1	Referenzbeton: High-Volume Fly Ash Concrete .....	74

6.2	Bestimmung rheologischer Parameter im Mischer KKM-R 30.....	77
6.2.1	Vergleichende Messungen zwischen KKM-R 30 und dem Rheometer.....	77
6.2.2	Bestimmung der Fließkurve.....	80
6.2.3	Bestimmung der dynamischen und der statischen Fließgrenze .....	84
6.2.4	Bestimmung der Hysterese-Fläche.....	86
6.3	Oszillations-Versuche .....	87
6.3.1	Amplituden-Test .....	87
6.3.2	Sprungversuch.....	92
6.4	Optimierung des inneren Mischwerkzeugs.....	92
6.5	Auswirkungen verschiedener Mischregime.....	94
<b>7</b>	<b>Auswertung der Versuchsergebnisse.....</b>	<b>100</b>
7.1	Bestimmung rheologischer Parameter im Mischer KKM-R 30.....	100
7.1.1	Fließkurven.....	100
7.1.2	Dynamische und statische Fließgrenze .....	108
7.2	Verifizierung des KKM-R 30 durch Vergleichsmessungen.....	109
7.2.1	KKM-R 30 und Rheometer ICAR RHM-3000.....	109
7.2.2	KKM-R 30 und LCPC Box.....	111
7.2.3	Rheometer ICAR RHM-3000 und LCPC Box.....	112
7.3	Festigkeitsentwicklung und Erstarrungsverhalten.....	113
7.3.1	Bestimmung des Erstarrungsendes (BEUS).....	113
7.3.2	1-Tages-Würfeldruckfestigkeiten.....	114
7.3.3	Festigkeitsentwicklung.....	115
7.4	Rheometrische Mischprozessführung .....	116
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>121</b>
8.1	Zusammenfassung.....	121
8.2	Ausblick.....	122
8.2.1	Weitere Verbesserungen der Mischtechnik .....	122
8.2.2	Weitere Verbesserungen zur Erfassung der rheologischen Parameter.....	122
8.2.3	Einsatzbereich Transportbeton .....	123
<b>9</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>123</b>

# 1 Einführung

## 1.1 Ausgangslage

Die betontechnologischen Entwicklungen der zurückliegenden fünfzehn Jahre haben die Leistungsfähigkeit von Beton auf ein zuvor nicht für möglich gehaltenes Niveau angehoben. Selbstverdichtende sowie hoch- und ultrahochfeste Betone sind heute Gegenstand der Optimierung an Forschungseinrichtungen. Von zentraler Bedeutung sind dabei die zur Verflüssigung eingesetzten Zusatzmittel auf PCE-Basis. Da bis dato kein Hydratationsmodell für Betone mit Fließmittel existiert [1], werden der Typ und die Menge des Fließmittels empirisch im Mischversuch festgelegt.

Die rheologischen Eigenschaften des so hergestellten Frischbetons werden durch erstrangige und zweitrangige Einflussparameter bestimmt [2]. Die erstrangigen Einflussparameter erfassen beispielsweise die Art und Form der Gesteinskörnung, den Wassergehalt und den Gehalt an Zusatzmitteln, die zweitrangigen Parameter unter anderem die Dosierreihenfolge, die Mischerart und die Mischdauer.

Die Entwicklung, insbesondere von UHPC, erfolgt häufig nur im Labormaßstab und unter Einsatz des Intensivmischers vom Typ Eirich. Da in der Praxis in der Regel Mischer mit einem anderen Mischprinzip zum Einsatz kommen, ist die Übertragbarkeit aus den Laborversuchen nicht gegeben [3]. Einen weiteren Beleg für die Bedeutung der zweitrangigen Parameter liefert [4]. Durch ein dreistufiges Mischregime (Leim, Mörtel, Beton) in einem Doppelwellen-Mischer mit konstanter Drehzahl konnten die Frischbetoneigenschaften eines hochfesten Betons deutlich verbessert werden.

Das Fließverhalten lässt sich nach dem Modell von Bingham durch die Fließgrenze und die plastische Viskosität beschreiben. Während die Fließgrenze den Übergang vom reversiblen ideal-elastischen zum irreversiblen viskoelastischen oder viskosen Fließverhalten beschreibt [5], ist die plastische Viskosität ein Maß für den Fließwiderstand des Betons. Auch in der Betonentwicklung werden vorrangig standardisierte Prüfverfahren für Mörtel und Beton eingesetzt. Verfahren wie der Setzfließversuch nach DIN EN 12350-8 werden von [6] in die quantitativ empirische Klasse 2 eingeordnet. Dabei werden die Fließgrenze und die plastische Viskosität jedoch nicht getrennt bestimmt, sondern gehen „verschmiert“ in den Messwert ein. Zudem sind die Messwerte im Setzfließversuch abhängig von der Größtkörnung des untersuchten Betons [7]. Findet die Mischungsentwicklung alternativ am Leim statt, kann aus Versuchen mit dem Haegermann-Trichter zumindest die Fließgrenze in absoluten Einheiten berechnet werden [8]. Allerdings ist die Frage nach der Übertragbarkeit der Leimversuche auf den Beton in der Fachwelt umstritten [9]. Beton-Rheometer, die die Fließgrenze und die plastische Viskosität über verschiedene rheologische Modelle berechnen können, werden in der Praxis noch sehr selten eingesetzt. Neben dem hohen Anschaffungspreis sind diese Versuche zeit- und arbeitsintensiver als die standardisierten Verfahren. Da zudem nach [7] alle Beton-Rheometer zumindest eine Randbedingung zur Messung rheologischer Parameter nicht erfüllen, liefern die Geräte unterschiedliche Werte in absoluten Einheiten. Die Geräte sind jedoch in der Lage, für die Betone mit unterschiedlichen rheologischen Eigenschaften die richtige Reihenfolge bezüglich Fließgrenze und plastischer Viskosität zu ermitteln [10]. Welches Rheometer die Messwerte mit der geringsten Abweichung vom tatsächlichen Wert liefert, kann indes nicht bestimmt werden [7].

Es existieren mehrere Verfahren, um die Fließeigenschaften des Betons im Mischer zu erfassen. Seit Jahrzehnten wird mit dem „Wattmeter“ oder „Ampèremeter“ aus der Entwicklung der Leistungsaufnahme über die Zeit die Mischdauer festgelegt. Nähert sich die Leistungsaufnahme ohne große Schwankungen asymptotisch einem Endwert, wird der Mischvorgang abgebrochen. Werden Frequenzumrichter zur Regulierung der Drehzahl eingesetzt, können durch ein mehrstufiges Absenken der Drehzahl Parameter in Anlehnung an das Bingham-Modell bestimmt werden. Da die rheologischen Randbedingungen zur Bestimmung von Absolutwerten nicht erfüllt sind, werden die Parameter in den relativen Einheiten Drehzahl und Drehmoment bestimmt. Ein weiteres vom Mischerantrieb unabhängiges relatives Verfahren (Viscoprobe™) ermittelt den Fließwiderstand einer in Beton getauchten Stahlkugel und bestimmt daraus die rheologischen Parameter.

Zusammenfassend existieren nur wenige Erkenntnisse über den Einfluss verschiedener Mischregime - im Wechselspiel mit Hochleistungsfließmitteln - auf die Rheologie und den erforderlichen Energieeintrag. Für Labormischer ist gegenwärtig zudem kein System erhältlich, das die Rheologie des Mischgutes im Mischer erfasst.

### **1.2 Zielsetzung**

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Einfluss verschiedener Mischregime - mit variablen Drehzahlen des Mischwerkzeugs und Dosierreihenfolgen der Ausgangsstoffe im Wechselspiel mit Hochleistungsfließmitteln - auf die Rheologie, die frühe Festigkeitsentwicklung und den erforderlichen Energieeintrag eines Hochleistungsbetons aufzuzeigen.

Als Referenzbeton wurde ein sogenannter HVFA-Beton herangezogen, der durch eine kostenoptimierte Zusammensetzung, eine exzellente Dauerhaftigkeit und eine 90d-Festigkeit bis  $125 \text{ N/mm}^2$  gekennzeichnet ist. Als nachteilig erweist sich lediglich eine Mischzeit von ca. vier Minuten in einem konventionellen Mischer. Neben der Verkürzung der Mischzeit stehen daher im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Absenkung der erforderlichen Mischenergie und die Verringerung der plastischen Viskosität im Fokus.

Durch die Bestimmung der rheologischen Parameter jeder einzelnen Charge im Mischer sollen die unvermeidlichen Schwankungen durch die natürlichen Ausgangsstoffe erfasst werden. Mit der Nachdosierung von Betonzusatzmitteln bzw. Betonzusatzstoffen soll die Rheologie der Einzelcharge dann an eine hinterlegte Referenz angenähert werden, um so die Schwankungsbreite der rheologischen Eigenschaften im laufenden Betrieb zielsicher zu reduzieren.

### **1.3 Vorgehensweise**

In Kapitel 2 folgt die Literatursichtung, um den gegenwärtigen Kenntnisstand zur erfolgreichen Bearbeitung der Problematik in Abschnitt 1.1 aufzuzeigen.

In Kapitel 3 wird das Anforderungsprofil für den Labormischer aufgestellt, der im Rahmen dieser Arbeit entworfen, gebaut und genutzt wird. Die Anforderungen ergeben sich aus der Mischtechnik, der Dosiertechnik für die Zuführung der einzelnen Ausgangsstoffe und aus der Bestimmung der rheologischen Parameter im Mischer.

## Kapitel 1 Einführung

---

In Kapitel 4 wird auf Basis der zuvor formulierten Anforderungen die gewählte technische Umsetzung detailliert erläutert.

In Kapitel 5 werden die für die experimentellen Untersuchungen im nachfolgenden Kapitel eingesetzten Verfahren beschrieben. Das betontechnologische Konzept des eingesetzten HVFA-Betons wird in Kapitel 6 aufgezeigt. Ebenso die einzelnen Messungen die an den Frisch- und Festbetonen durchgeführt wurden. Diese umfassen neben der Rheologie das Erstarrungsverhalten, die Frühfestigkeit und die Würfeldruckfestigkeiten bis zum Betonalter von 90 Tagen.

Kapitel 7 ermöglicht die ganzheitliche Bewertung der unterschiedlichen Mischregime im Hinblick auf die Frischbeton-Rheologie, die Festigkeitsentwicklung und den Energiebedarf zur Herstellung des Betons. Die Einsatzbereiche und Grenzen der einzelnen Verfahren zur Bestimmung rheologischer Parameter werden ebenfalls erkennbar.

Die wesentlichen Erkenntnisse der Arbeit und die Optimierungspotentiale werden in Kapitel 8 angeführt.

## 2 Literatursichtung

### 2.1 Mischen

#### 2.1.1 Mischgutbewegungen und Mischgüte

Beim Mischen werden die Ausgangsstoffe des Betons, die sich unter anderem hinsichtlich Größe, Dichte und Aggregatzustand unterscheiden, im Mischbehälter bewegt und von einem Kornhaufwerk in eine granulare Suspension überführt. Die Frischbetoneigenschaften und die Festigkeitsentwicklung des Betons sind von der dabei erreichten Mischgüte abhängig [11]. Der Mischvorgang selbst kann dabei in die zwei Einzelvorgänge Konvektion und Dispersion unterteilt werden [12], die jedoch einander überlagert sind [Bild 2.1].

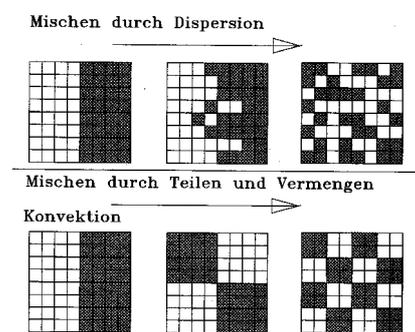


Bild 2.1: Mechanismen des Mischens [12]

Die Dispersion beschreibt dabei einen lokalen Effekt, den zufälligen Platzwechsel einzelner Partikel infolge einer durch das Mischwerkzeug erzwungenen Bewegung. Erschwert werden die Platzwechsel, wenn sich durch starke interpartikuläre Kräfte Agglomerate ausbilden. [12] nennt u.a. Flüssigkeitsbrücken zwischen Partikeln in Anwesenheit von geringen Flüssigkeitsmengen und elektrostatische Kräfte wie die wechselseitig induzierten Dipolkräfte (van-der-Waals-Kräfte) bei Partikeln kleiner 30  $\mu\text{m}$ . Die für die Auflösung der Agglomerate (Deagglomeration) in Frage kommenden Mechanismen sind nach [13] die Erosion durch Reibung, das Teilen durch sehr hohe Scherkräfte und Zugbeanspruchungen sowie das Zerschneiden durch Kollision (Bild 2.2). Dominant ist dabei das Zerschneiden infolge einer Kollision [14].

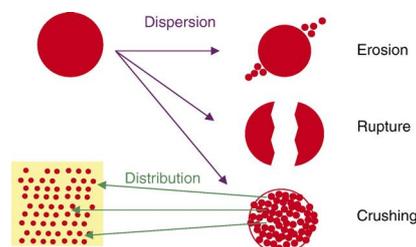


Bild 2.2: Mechanismen der Deagglomeration von kohäsiven Partikeln [14]

Bereits 1968 hat POWERS [15] beschrieben, dass der Leim durch die grobe Gesteinskörnung so effektiv homogenisiert wird, wie durch einen hochtourig laufenden Labormixer. Die Relativbewegungen der groben Gesteinskörnung wirken dabei wie „Mikromischer“ und unterstützen die Dispersion durch Aufbrechen der Agglomerate. Die dabei lokal und kurzzeitig wirksamen Scherbeanspruchungen sind abhängig vom Partikelabstand, der Art

der Partikel sowie von der Frequenz und dem Eintrag von kinetischer Energie durch die Mischwerkzeuge. Der Dispersionseffekt nimmt folglich mit steigender Werkzeuggeschwindigkeit zu. Zudem begünstigt eine hohe Packungsdichte die Dispersion [14].

Um den Platz mit einem Partikel einer anderen Komponente tauschen zu können, müssen möglichst viele Partikel der anderen Komponente im direkten Umfeld vorhanden sein. Für den dispersiven Transportvorgang ist also eine effektive Grobvermischung einzelner Partikelgruppen (Bild 2.1) essentiell.

Während für die Dispersion, die auch als dispersives Mischen oder „micro-mixing“ bezeichnet wird, wenig Literatur für Beton existiert, ist die Konvektion (distributives Mischen oder „macro-mixing“) Inhalt zahlreicher Veröffentlichungen. Die distributiven Transportvorgänge wurden dabei als entscheidend für eine hohe Mischgüte angesehen. In Normalbetonen wird davon ausgegangen, dass nach Mischende die Agglomerate weitestgehend aufgelöst sind [14]. In [16] wird darauf hingewiesen, dass nur das konvektiv verteilt werden kann, was zuvor feinverteilt wurde. Die Effizienz des Mischvorgangs ist also abhängig von der Leistungsfähigkeit der beiden Einzelvorgänge.

Obwohl die genauen physikalischen Zusammenhänge nicht bekannt sind [16], scheinen die durch die grobe Gesteinskörnung verursachten kurzzeitigen, sehr intensiven lokalen Deformationen des Leims die Konvektion stärker zu beeinflussen, als die durch den Mischer verursachten Relativbewegungen des Mischgutes. Die Konvektion wird durch einen hohen Wassergehalt und eine niedrige Packungsdichte des Betons begünstigt. Damit steigt der Partikelabstand, die Viskosität des Leims sinkt und die Beweglichkeit der Partikel ist durch das Zwickelvolumen gewährleistet [16].

Während für Normalbeton Mischzeiten von etwa 35 Sekunden nach Wasserzugabe (Nass-Mischdauer) üblich sind [17], benötigen ultrahochfeste Betone in Standard-Mischern bei Teilfüllung bis zu 10 Minuten Nassmischzeit [18]. Ursächlich sind der deutlich verminderte Wassergehalt sowie der hohe Gehalt an Zusatzmitteln und Zusatzstoffen hoher Feinheit.

CAZACLIU et al. [19] gelang für einen Feinkorn-UHPC, der in einem Doppelwellen-Mischer hergestellt wurde, die sechs nachfolgenden Zustände des Mischgutes aufzuzeigen und mit der Leistungsaufnahme des Mischerantriebs zu identifizieren. Neben der Leistungsaufnahme selbst ermöglichen die Schwankungen in der Leistungsaufnahme während des Mischprozesses die Unterscheidung der einzelnen Phasen.

1. In der Trockenmischphase besteht ein niedriger konstanter Leistungsbedarf bei sehr geringen Schwankungen in der Leistungsaufnahme (Bild 2.3 , „initial mixing stage“).
2. Nach Zugabe der Flüssigkeit steigt die Leistungsaufnahme sehr schnell an und unterliegt starken Fluktuationen. In dem wenige Sekunden nach Flüssigkeitszugabe trocken erscheinenden Mischgut sind vereinzelt kleine Granulate erkennbar. Dabei handelt es sich um Wassertropfen, die von Partikeln umgeben sind (Bild 2.4 Nr. 1).

3. Aufgrund der Mischgutbewegung drängt Flüssigkeit aus dem Inneren an die Oberfläche der Granulate. Durch die Anlagerung trockener Partikel nimmt der Durchmesser zu. Die Granulate erscheinen weiterhin trocken. Die Leistungsaufnahme steigt nur geringfügig weiter an und die Schwankungen sind nahezu konstant (Bild 2.4 Nr. 2).
4. Weiterhin drängt Flüssigkeit an die Oberfläche der Granulate. Da nur noch wenige trockene Partikel verblieben sind, vereinigen sich die oberflächenfeuchten Granulate in Teilbereichen der Mischung. Die Leistungsaufnahme steigt mit starken Schwankungen drastisch an (Bild 2.4 Nr. 3 und Nr. 4).
5. Die Vereinigung der Granulate schreitet weiter voran, die Leistungsaufnahme schwankt stark, sinkt aber deutlich. CAZACLIU [19] beschreibt das Mischgut in dieser Phase als Material mit „himbeerartiger Oberfläche“ (Bild 2.4 Nr. 5).
6. Das Mischgut wird in eine Suspension überführt, die Klumpen enthält. Die Agglomerate werden aufgebrochen, das darin enthaltene Wasser freigesetzt und die kleinen Partikel füllen die Zwickelräume der Gesteinskörnung. Die Oberfläche der Suspension wird mit voranschreitender Auflösung der Agglomerate und der Dispergierung der Partikel glatter. Die möglichst vollständige Auflösung der Agglomerate ist erforderlich, da diese die Fließfähigkeit des Frischbetons vermindern [20]. Während die Leistungsaufnahme kontinuierlich sinkt, treten nur noch minimale Schwankungen auf (Bild 2.4 Nr. 6).

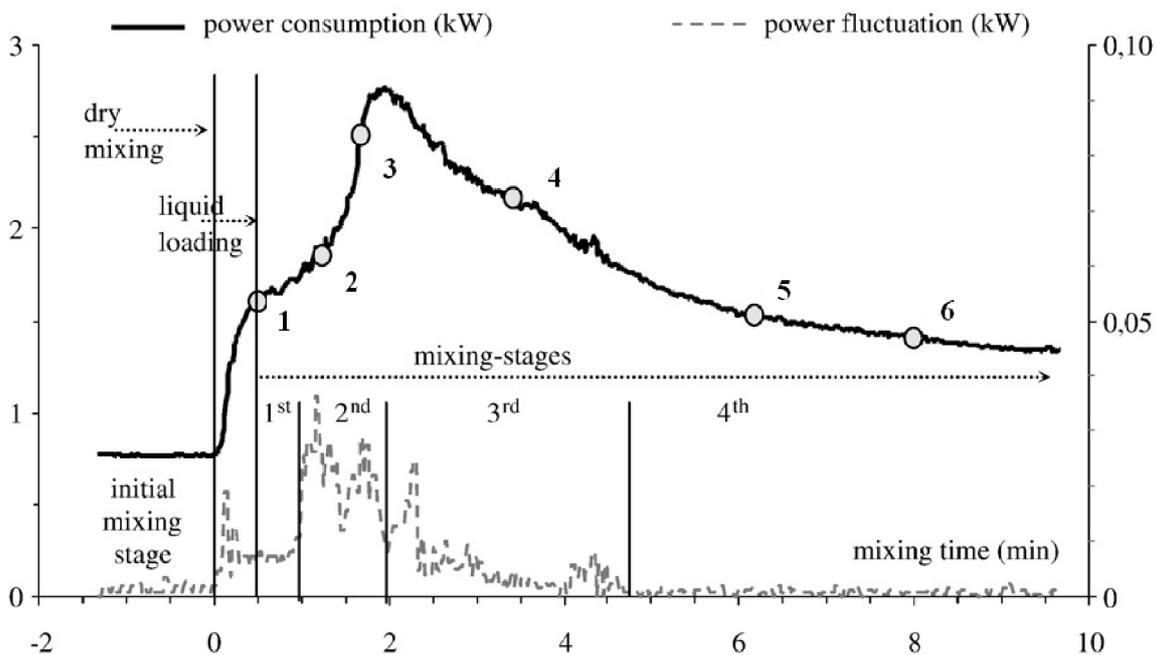


Bild 2.3: Entwicklung der Leistungsaufnahme und Schwankungen in der Leistungsaufnahme eines Labor-Doppelwellen-Mischer während der Herstellung eines Feinkorn-UHPC [19]

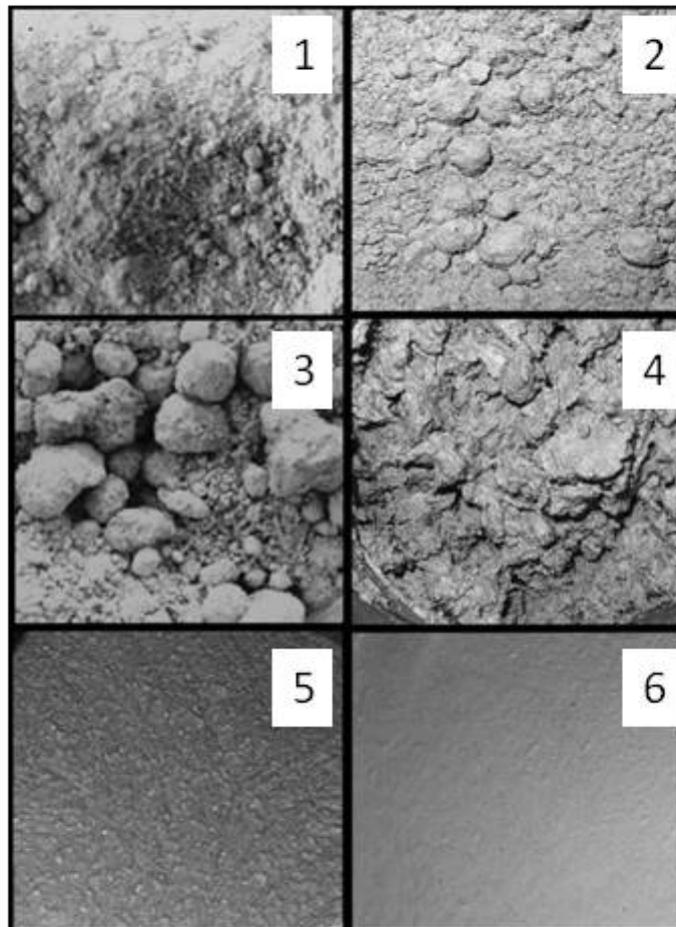


Bild 2.4: Feinkorn-UHPC 30 s (Bild 1), 90 s (Bild 2), 120 s (Bild 3), 180 s (Bild 4), 360 s (Bild 5) und 480 s (Bild 6) nach Wasserzugabe in einem Labor-Doppelwellen-Mischer [19]; die Entwicklung der Leistungsaufnahme zeigt Bild 2.3

DE LARRARD et al. [11] weisen darauf hin, dass die Leistungskurve bei SVB und anderen Betonen mit hohem Fließmittel-Gehalt in der letzten Mischphase nur noch minimal abfällt und somit ein eindeutiges Abbruchkriterium für den Mischvorgang fehlt. Alternativ kann mit dem Multiparameter-Modell [11] nach Gleichung 2.1 die Leistungsaufnahme über die Mischdauer für unterschiedliche Mischer-Typen abgebildet werden.

$$P(t) = P_{\infty} + P_d \cdot e^{\left(\frac{-t}{t_d}\right)} + \frac{2 \cdot P_m}{\pi} \cdot \left( \arctan\left(\frac{t_a - t}{t_m}\right) + \frac{\pi}{2} \right) \quad (\text{Gl. 2.1})$$

Die Formel setzt sich zusammen aus dem ersten Term für die Leistungsaufnahme des Mixers infolge der Rheologie des jeweiligen Betons, dem zweiten Term für die schnelle Verteilung der groben Partikel ( $t_d \approx 20\text{s}$ ) und dem dritten Term für die langsam ablaufenden Vorgänge ( $t_m$ ) wie die Deagglomeration und die Benetzung feiner Partikel. Der Zeitpunkt  $t_a$  legt die maximale Leistungsaufnahme des Mischerantriebs fest. Als Abbruchkriterium für den Mischvorgang (Stabilisationszeit  $t_s$ ) wird die Steigung des Quotienten aus  $P(t_s)/P_{\infty}$  mit  $\varepsilon = 0.004$  herangezogen.

Nach [17] werden bis zur Stabilisationszeit ( $t_1$  nach [17]) hauptsächlich die Konzentrations-Gradienten der Ausgangsstoffe im Mischgut minimiert. Um eine definierte, homogene Verteilung (Dispergierung) der Feinpartikel zu erreichen, ist der Mischvorgang bis zum Zeitpunkt  $t_2$  fortzusetzen. Für den untersuchten Einwellen-Mischer waren - in Abhängigkeit vom Beton-Typ - 5 Prozent bis 23 Prozent der Mischenergie für die Dispergierung erforderlich, der Zweiwellen-Mischer benötigte hingegen - nahezu unabhängig vom Beton-Typ - lediglich 11 Prozent bis 15 Prozent der Mischenergie. Die rheologischen Eigenschaften des Betons ändern sich nach der Stabilisationszeit  $t_1$  (bzw.  $t_s$ ) nicht mehr ([17] und [21]).

Die Leistungsfähigkeit eines Mixers zur Herstellung von Beton wird nach DIN EN 459-2 [22] oder nach RILEM TC 150-ECM [23] bestimmt.

Dabei wird die Leistungsfähigkeit in [23] definiert als „*uniformly distribute all its constituents in the container without favoring one or the other*“. Die Gleichmäßigkeit des Gemisches wird durch den Vergleich der Anteile von festgelegten Ausgangsstoffen in Frischbetonproben geprüft. Bei den sieben Testbetonen [23] unterschiedlicher Konsistenzklassen handelt es sich um klassische 3-Stoff-Systeme, bestehend aus: Gesteinskörnung, Zement und Wasser. Die Qualität einer Mischung ist umso besser, je geringer die Abweichung einer Stichprobe von der Konzentration der Gesamtmischung ist. Mathematisch kann dies mit der Varianz beschrieben werden. Da nur eine Anzahl von  $n$  zufällig verteilten Proben über die Grundgesamtheit analysiert wird, erhält man die Stichprobenvarianz  $s^2$  [12]. Dabei gelten die nachfolgenden Zusammenhänge:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{Gl. 2.2})$$

Arithmetisches Mittel mit  $n$  Proben und der Konzentration  $x_i$  in jeder Probe

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{Gl. 2.3})$$

Stichprobenvarianz  $s^2$

$$s = \sqrt{s^2} \quad (\text{Gl. 2.4})$$

Standardabweichung als Wurzel aus der Stichprobenvarianz

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (\text{Prozent}) \quad (\text{Gl. 2.5})$$

Variations-Koeffizient

Gemäß Bild 2.5 führt eine sehr hohe Anzahl an Zufallsproben lediglich zu einer geringfügigen Verbesserung des relativen Fehlers. Die Autoren empfehlen deshalb im Regelfall einen Probenumfang  $n$  zwischen 18 und 21 zur Berechnung der statistischen Größen, die zur Einstufung des Mixers in 3 Leistungsstufen benötigt werden.

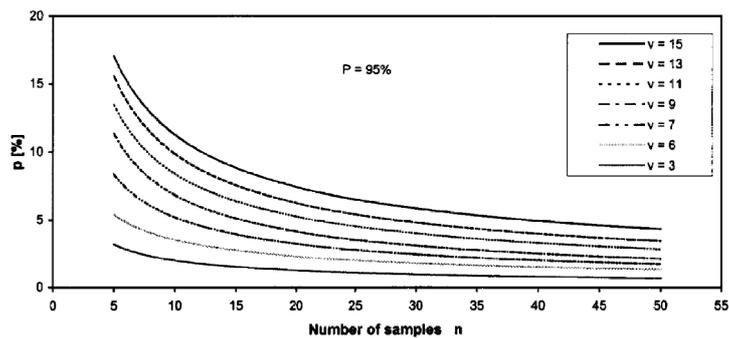


Bild 2.5: Auswirkung des Probenumfangs  $n$  auf den relativen Fehler  $p$  bei konstanten Variationskoeffizienten  $v$  [23]

Alternativ bestünde die Möglichkeit, die von der Mischgüte abhängigen makroskopischen Eigenschaften wie die Druckfestigkeiten oder die rheologischen Kennwerte zu bestimmen. Die Druckfestigkeit ist jedoch ungeeignet, da bei der Bestimmung der Druckfestigkeit, infolge zahlreicher möglicher Fehlerquellen, Schwankungen der Messwerte von bis zu 30 Prozent nachgewiesen wurden [23].

In [14] und [16] wurde ein Verfahren beschrieben, mit dem ein Mischer hinsichtlich der konvektiven und der dispersiven Leistungsfähigkeit bewertet werden kann. Da für beide Transportvorgänge die Komponente der Ausgangsstoffe relevant ist, die den geringsten Durchmesser hat, wurden die Betrachtungen auf den Zement bezogen. 0,8 Masse-Prozent Zement wurde durch den Tracer Eisenoxid-Pigmente (Bayferrox) ersetzt und während des Mischvorgangs zu unterschiedlichen Zeitpunkten mit einem Colorimeter in den Zufallsproben detektiert. Um die Effizienz des Mixers hinsichtlich der Grobvermischung zu bestimmen, wurde ein nicht kohäsives Eisenoxid (Bayferrox 110 P) eingesetzt. Durch die Verwendung eines granulierten Tracers (Bayferrox 110 G) wurde die dispersive Leistungsfähigkeit verschiedener Mixer evaluiert.

Im Gegensatz zu den anderen Untersuchungsmethoden wurden bei [17] keine Zufallsproben entnommen. Mit einer CCD-Kamera wurden vom Mischgut während des Mischvorgangs auf einer Fläche von 366,8 mm<sup>2</sup> mit einer Auflösung von 720x576 Pixeln Aufnahmen gemacht. Mit einer Bildbearbeitung wurde der Tracer Ultramarin Blau, der über zementähnliche Eigenschaften verfügt, sichtbar gemacht und zur Bewertung der Gleichmäßigkeit herangezogen.

### 2.1.2 Froude-Zahl und Werkzeuggeschwindigkeit

Die Werkzeuggeschwindigkeit (bzw. Umfangsgeschwindigkeit)  $v$  in [m/s] berechnet sich aus dem Radius  $r$  [m] des Mischwerkzeuges bzw. des Behälters und dessen Drehzahl  $n$  [s<sup>-1</sup>].

$$v = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot n \quad (\text{Gl. 2.6})$$

Werkzeuggeschwindigkeit  $v$  in [m/s]

Der Bewegungszustand des Mischgutes kann mit der dimensionslosen Froude-Zahl ( $Fr$ ) nach Rumpf [12] aus dem Verhältnis von Zentrifugalkraft zur Gewichtskraft beschrieben werden. Da sich im Mischer nicht Einzelpartikel sondern Partikelkollektive bewegen und Wechselwirkungen zwischen den Partikelkollektiven und den Einzelpartikeln stattfinden, ist die Betrachtung von Einzelpartikeln mit der Masse  $M_p$  kaum möglich. Zudem ist die

Kreisfrequenz  $\omega_p$  eine Funktion der schwer zu beschreibenden Partikelposition  $R_p$  [24]. Folglich bereitet die Berechnung der Partikel-Froude-Zahl große Probleme [25].

$$Fr_p = \frac{M_p \cdot \omega_p^2 \cdot R_p}{M_p \cdot g} = \frac{\omega_p^2 \cdot R_p}{g} \quad (\text{Gl. 2.7})$$

Partikel-Froude-Zahl  $Fr_p$  [-]

Alternativ wird - in erster Näherung [25] - die Maschinen-Froude-Zahl aus der Drehgeschwindigkeit  $n$  [ $s^{-1}$ ] des Mischwerkzeuges oder des Mischbehälters berechnet, ohne das hierbei Materialparameter eingehen.

$$Fr_M = \frac{r \cdot \omega^2}{g} = \frac{r \cdot n^2 \cdot 4 \cdot \pi^2}{g} \quad (\text{Gl. 2.8})$$

Maschinen-Froude-Zahl  $Fr_M$  mit Radius  $r$  in [m], Umdrehungen pro Sekunde [ $n$ ] $^{-1}$ , Erdbeschleunigung  $g$

Da die Drehzahl bei der Berechnung der Froude-Zahl im Quadrat eingeht, weisen Mischwerkzeuge mit kleinem Radius bei gleicher Froude-Zahl geringere Werkzeuggeschwindigkeiten auf als Mischwerkzeuge mit großem Radius. Exemplarisch wird dies an dem Einwellen-Labormischer EMS 60 C (Nennvolumen nach DIN 459-2: 0,06 m<sup>3</sup>) und einem Einwellen-Produktionsmischer EMS 1000 (Nennvolumen: 1 m<sup>3</sup>) aufgezeigt (Tabelle 2.1). Während sich die Maschinen-Froude-Zahlen bei der jeweiligen Maximaldrehzahl nahezu auf einem Niveau bewegen, erreicht der Labormischer lediglich ca. 70 Prozent der Werkzeuggeschwindigkeit des Produktionsmischers. Um die Werkzeuggeschwindigkeit des Produktionsmischers zu erreichen, wäre eine Anhebung der Drehzahl des Labormischers auf 108 UPM notwendig, was mit einer um den Faktor 2,4 höheren Maschinen-Froude-Zahl als beim Produktionsmischer verbunden wäre.

	Radius Mischwelle [m]	Drehzahl [UPM]	Umfang Mischwelle [m]	Werkzeuggeschwindigkeit [m/s]	Froude-Zahl [-]
EMS 60 C (Maximaldrehzahl)	0,3	75	1,88	2,36	1,89
EMS 60 C (Fr = EMS 1000)	0,3	70	1,88	2,2	1,64
EMS 60 C (fiktive Drehzahl)	0,3	108	1,88	3,39	3,91
EMS 1000 (Maximaldrehzahl)	0,72	45	4,52	3,39	1,63

Tabelle 2.1: Werkzeuggeschwindigkeiten und Maschinen-Froude-Zahlen für einen Einwellen-Labormischer mit 0,06 m<sup>3</sup> Nenninhalt und einen Einwellen-Produktionsmischer mit 1 m<sup>3</sup> Nenninhalt

Bei dem Einwellenmischer handelt es sich nach der Einteilung von [24] um einen Schubmischer, bei dem ein nahezu geschlossenes Haufwerk (Gutbett) vorliegt und Agglomerate großer Festigkeit selbst bei langen Mischzeiten nicht aufgelöst werden können (Bild 2.6 links [[26]]). Wird die Maschinen-Froude-Zahl durch Anhebung der Drehzahl auf über 2,5 gesteigert, geht der Schubmischer durch Auflockerung und Teilfluidisierung des Mischgutes in einen Wurf- oder Schleudermischer über (Bild 2.6 Mitte [[26]]). In dem mechanisch erzeugten Wirbelbett erfolgt die Deagglomeration durch deutlich höhere Scher- und Prallkräfte. Durch eine weitere Erhöhung der Drehzahl (Bild 2.6 rechts [[26]]) gelingt eine vollständige Fluidisierung und Zirkulation des Mischgutes in einer verdichteten Ringschicht. Infolge äußerer Reibung zwischen innerer Mischerwandung und Mischwerkzeug und der inneren Reibung innerhalb des Haufwerks steigt die Temperatur rasch an.

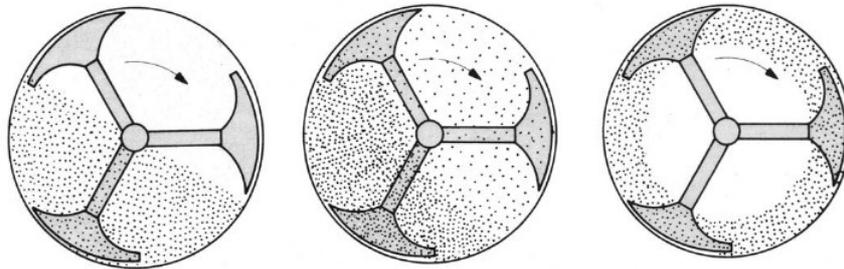


Bild 2.6: Schüttgut-Bewegungen in einem Pflugscharmischer bei  $Fr_M < 2,5$  (links);  $2,5 < Fr_M < 11$  (Mitte) und  $Fr_M > 11$  (rechts) nach [26]

### 2.1.3 Mischtechnik zur Herstellung von Normalbeton

Jeder Mischvorgang ist eine Überlagerung von distributiven und dispersiven Transportvorgängen. Die Anforderungen an die Mischtechnik sind für beide Transportmechanismen bei Normalbeton deutlich geringer als bei Hochleistungsbeton. Nach [16] ist ein höherer Wassergehalt durch größere interpartikuläre Abstände und eine geringere Viskosität des Leims für die Grobvermischung förderlich. Eine für Hochleistungsbeton charakteristische hohe Packungsdichte verschlechtert die distributive Leistungsfähigkeit des Mixers, da das für die Partikel frei zugängliche Zwickelvolumen vermindert wird. Im Umkehrschluss stellen Normalbetone mit ihren relativen hohen w/b-Werten und einer normalen Packungsdichte keine erhöhten Anforderungen an die distributive Leistungsfähigkeit des Mixers. Da Normalbetone keine zur Agglomeration neigenden hochfeinen Superpuzzolane (Silika, Feinstflugaschen, Metakaolin etc.) enthalten, ist der Anteil von Partikeln kleiner 10  $\mu\text{m}$  aus Zement und Zusatzstoffen gering. Somit ergeben sich auch keine hohen Anforderungen im Hinblick auf die Dispergierung.

So nimmt es nicht Wunder, dass sich zur Herstellung von Normalbetonen Mischsysteme durchgesetzt haben, bei denen das Mischgut nahezu vollständig im Umlauf ist und beide Transportvorgänge durch das (die) Mischwerkzeug(e) initiiert werden. Dazu zählen neben Tellermischern auch Einwellen- und Doppelwellen-Mischer. Exemplarisch sind in Bild 2.7 die Transportvorgänge für einen Doppelwellen-Mischer (BHS [[27]]) dargestellt.

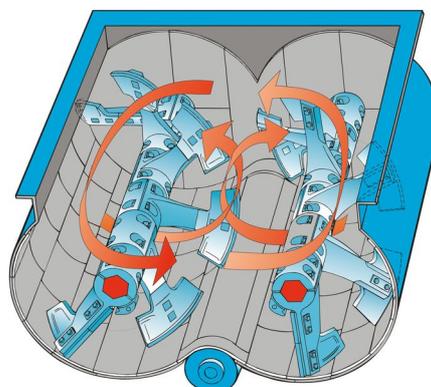


Bild 2.7: Dreidimensionales Mischen in einem Doppelwellen-Mischer BHS [27]

### 2.1.4 Anforderungen an die Mischtechnik zur Herstellung von Hochleistungsbeton

Die Mischungszusammensetzungen von (Ultra-) Hochleistungsbetonen beeinflussen sowohl die distributiven als auch die dispersiven Transportvorgänge im Mischer. Die geringere Wassermenge und die erhöhte Packungsdichte durch die Verwendung von Mikrofüllern verschlechtern die Grobvermischung [16]. Die Autoren weisen darauf hin, dass die Effizienz der Grobvermischung von der Partikelgröße abhängig ist. Kleine Partikel benötigen länger und es ist schwieriger einen kleinen Variations-Koeffizienten zu erreichen. Da der Anteil an Ausgangsstoffen mit geringem Durchmesser bei (U)HPC grundsätzlich erhöht ist, ergeben sich bereits daraus erhöhte Anforderungen. Der Durchmesser der größten Bestandteile ist auch für die Feinvermischung von Bedeutung, da die von der Partikelgröße abhängige kinetische Energie diesen Vorgang entscheidend beeinflusst. Mischungen mit kleinem Größtkorn müssen mit höherer Werkzeuggeschwindigkeit gemischt werden, da der Dispergierungs-Effekt mit der Drehzahl zunimmt [14]. Bei zu geringer spezifischer Antriebsleistung [kW/1000kg Mischgut] überwiegt der distributive Anteil und Agglomerate werden nicht aufgebrochen [25].

### 2.1.5 Anpassung der Mischtechnik an Hochleistungsbeton

Die nicht spezifizierte Anhebung der Werkzeuggeschwindigkeit bei einem Einwellen-Produktionsmischer (Nennvolumen 2 m<sup>3</sup>) ermöglichte die Halbierung der Nass-Mischdauer für einen SVB auf 45 Sekunden [28]. Eigene Untersuchungen an einem Labormischer desselben Herstellers bestätigten die Halbierung der Nassmischzeit eines selbstverdichtenden Betons durch Anhebung der Wellendrehzahl um 50 Prozent. Der serienmäßige Antrieb wurde dabei allerdings zeitweise um bis zu 100 Prozent überlastet [29]. Um auch Hochleistungsbetone mit sehr hohen Kohäsionskräften bei hoher Werkzeuggeschwindigkeit herstellen zu können, wurde die Motorleistung von 3 kW auf 7 kW erhöht.

Wenngleich die Anhebung der Werkzeuggeschwindigkeit bei Mischsystemen mit horizontalen Mischbehältern zu kürzeren Mischzeiten führt, steigt der Verschleiß erheblich an. Damit wird ein entsprechend verstärkter Schleißschutz erforderlich [30].

Bei vergleichenden Untersuchungen zwischen einem Einwellen- und einem Zweiwellen-Mischer eines Herstellers [17] wurde aufgezeigt, dass die Leistungsaufnahme bei einem Einwellen-Mischer deutlich stärker von der groben Gesteinskörnung und deren Anteil am Mischgut abhängt als bei einem Zweiwellen-Mischer. Das Mischwerkzeug des Einwellen-Mischers hat über einen großen Teil des Umlaufs einen sehr engen Spalt zur Mischer-Innenwandung, in dem sich grobe Bestandteile verklemmen und somit die Reibung erhöhen. Bei dem Zweiwellen-Mischer entsteht der eigentliche Widerstand im Überlappungsbereich der beiden Mischwerkzeuge. Da die beiden Mischwerkzeuge zudem immer das gleiche Volumen anheben, beeinflussen die während des Mischvorgangs ansteigenden Kohäsionskräfte die Leistungsaufnahme allenfalls bei UHPC.

In Mischversuchen [25] wird eine geringe Mischgüte für Mischer mit langsam laufenden Mischwerkzeugen nachgewiesen. Bei vielen von [23] untersuchten Mixern führten zu hohe Werkzeuggeschwindigkeiten zu Entmischungerscheinungen und somit zu einer erhöhten Varianz bei der Bestimmung der Mischgüte. Die Werk-

zeuggeschwindigkeit war nicht auf die Baugröße des Mixers abgestimmt. Um die Leistungsfähigkeit dieser Mixer-Typen zu steigern, empfehlen die Autoren die Verwendung von zusätzlichen Wirblern, deren Werkzeuggeschwindigkeit unabhängig von Hauptantrieb geregelt und somit an die jeweilige Mischaufgabe angepasst werden kann. Die Drehzahl des Hauptantriebs kann so auf einen für distributives Mischen sinnvollen Wert, ohne Entmischung der groben Gesteinskörnung, abgesenkt werden.

Der erforderliche bauliche Mehraufwand für die unabhängige Drehzahlregelung von Hauptantrieb und Wirbler(n) ist jedoch erheblich. In der Praxis werden deshalb vorwiegend Wirbler verbaut, die über den Hauptantrieb mit fester Übersetzung angetrieben werden. Der Variationskoeffizient derartig optimierter Mixer-Typen ist verringert, erreicht dennoch nicht die Werte eines Intensiv-Mixers Typ Eirich [25].

### 2.1.6 Intensiv-Mischer

Mit dem Ziel eine große Bandbreite an Betonen mit unterschiedlichsten Ausgangsstoffen bei minimalem Energieeinsatz, optimalen rheologischen Eigenschaften und innerhalb kürzester Mischzeit herzustellen, wird eine Steuerung der distributiven und dispersiven Anteile am Mischenergieeintrag erforderlich. Der im Vergleich zu Standard-Mischern technisch aufwändigere Intensiv-Mischer von Eirich entkoppelt durch den drehbaren Mischbehälter den Mischgut-Transport (Grobzirkulation) vom Wirbler, der den Platzwechsel der Partikel bewirkt [25]. Durch die Ausbildung des Mischwerkzeugs und dessen variable Geschwindigkeit kann der disperse Anteil am Mischenergieeintrag verändert werden. Die für Hochleistungsbetone förderliche deutliche Steigerung der Werkzeuggeschwindigkeit erfordert eine Steigerung der Antriebsleistung, die für Intensiv-Mischer charakteristisch ist und als spezifische Antriebsleistung (kW/1000 kg Mischgut) angegeben wird.



*Bild 2.8: Labor-Intensiv-Mischer, Typ Eirich mit einem Nennvolumen von 5 l und einem Stiftwirbler*

Gegenüber Standard-Mischern wird die spezifische Antriebsleistung zudem nicht in nahezu das gesamte Mischgut eingebracht, sondern nur in eine Teilmenge, die sich im Einflussbereich des Wirblers befindet (Bild 2.8). Als weiterer Vorteil wird die niedrige, vom Wirbler unabhängige Behältergeschwindigkeit benannt. Der mit einem Schleißchutz versehene Wirbler ist nicht randgängig und beansprucht somit auch bei hohen Drehzahlen

nicht die Innenwandung des Behälters. Lediglich der ortsfeste Rand-/Bodenabstreifer unterliegt dem Verschleiß durch den mit langsamer Geschwindigkeit drehenden Behälter [25].

### 2.1.7 Suspensions-Mischer

Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung von Beton besteht in der verfahrenstechnischen Trennung in Herstellung von Leim bzw. Mörtel in einem Suspensions-Mischer und in Vermengung der Suspension mit der groben Gesteinskörnung in einem zweiten Mischer bzw. bei Transportbetonanwendungen in einem Fahrmischer. In dem klassischen Anwendungsgebiet Bentonit-Suspension wird die größtmögliche physikalische Reaktion zwischen den Ausgangsstoffen während des Mischvorgangs im Suspensions-Mischer erreicht. Im Gegensatz zu anderen Mischprinzipien ist keine Nachquellphase erforderlich, um stabile rheologische Eigenschaften zu erlangen [31]. Da die größte Körnung der Feststoffe einer Zement-Suspension Einfluss auf die Eindringtiefe der Suspension bei einer Injektion hat, ist ein kolloidaler Aufschluss - die größtmögliche Verteilung der Partikel mit einem Durchmesser von ca. 0,1-0,001 mm in der Flüssigkeit - bedeutsam. Partikel mit Durchmessern unter 30  $\mu\text{m}$  neigen aufgrund ihrer großen Oberfläche und der interpartikulären Wechselwirkungen (van-der-Waals-Kräfte) zur Ausbildung von Agglomeraten und Agglomerat-Clustern. Deren Zwischenräume sind dabei mit Luft gefüllt und stellen somit selbst eine Dispersion von Feststoffen in Luft dar [29]. Nach Auflösung der Partikel-Zusammenschlüsse müssen die einzelnen Partikel mit Wasser- und Fließmittelmolekülen benetzt werden, um eine erneute Agglomeration zu verhindern. In einem Suspensions-Mischer (Bild 2.9) wird die Benetzung durch zwei Vorgänge erreicht. Das Mischwerkzeug arbeitet als Zentrifuge und führt die Flüssigkeit an die Innenwandung der Mischzelle. Der Scherspalt zwischen Mischwerkzeug und Mischer-Innenwandung beträgt ca. 3 mm und führt bei einer Werkzeuggeschwindigkeit von ca. 19 m/s zu einem Schergradienten von über 6000  $\text{s}^{-1}$  und einer Maschinen-Froude-Zahl von über 200 [-].



*Bild 2.9: Perforierter Blattrührer in der Mischzelle eines 5 l Labor-Suspensions-Mischers*

Um die Scherfläche zu erhöhen, sind die Blattrührer perforiert. Ein weiterer Effekt, der die Benetzung unterstützt, ist die Pseudo-Kavitation. Dabei expandiert die in den Agglomeraten enthaltene Luft durch die Absenkung des Partialdruckes in den hochturbulenten Zonen auf ein Vielfaches des Ausgangsvolumens. Die damit einhergehende Vergrößerung des Partikelabstandes vereinfacht den Benetzungsvorgang. Die nachfolgenden Impllosionen außerhalb der hochturbulenten Zonen wirkt als „Druckbenetzung“.

### 2.1.8 Mischtechnik in anderen Anwendungen

In Produkten der Lack- und Farbenindustrie, in Dichtmassen, Klebstoffen und bauchemischen Materialien ist die Einarbeitung pulverförmiger Rohstoffe als Füllstoff, Verdicker, Mattierungsmittel, Konservierungsmittel, Haftverbesserer, Antiabsetz- oder Thixotropiermittel erforderlich [32]. Konventionelle Rührwerke mit niedrigen Schergradienten (ca.  $20 \text{ s}^{-1}$ ) oder Dissolver (ca.  $50 \text{ s}^{-1}$ ) sind häufig nicht in der Lage das gewünschte Mischergebnis zu erreichen bzw. benötigen dafür Mischzeiten, die in der Produktion nicht akzeptabel sind. Systeme, die nach dem Rotor-Stator-Prinzip arbeiten, verfügen über Schergradienten bis zu  $50.000 \text{ s}^{-1}$ . Bei der Conti TDS von Ystral wird dazu auf einer Strecke von  $500 \mu\text{m}$  die Geschwindigkeit von  $25 \text{ m/s}$  auf null und wieder auf  $25 \text{ m/s}$  verändert. Im Betrieb bildet sich in der Mischkammer ein Vakuum aus, mit dem die Feststoffe angesaugt werden. Die Wege des expandierten, hochbeschleunigten Pulvers und des Flüssigkeitsstroms sind bis zur Kontaktzone in der Mischzelle vollständig getrennt. In der Benetzungszone erfolgt der Kontakt zur ebenfalls feinzerteilten und hochbeschleunigten Flüssigkeit. Es erfolgt also keine Einsaugung in einen Flüssigkeitsstrom, sondern eine Benetzung und Eindispersierung. Die aus den Agglomeraten verdrängte Luft kann im Anschluss zu Luftbläschen koagulieren und im Vorratsbehälter entlüften.

Ultraschall (Frequenzbereich  $16 \text{ kHz}$  bis  $1 \text{ GHz}$ ) ermöglicht das Mischen, das Disperieren und das Deagglomerieren nanoskaliger Partikel und ist somit für die Herstellung von Suspensionen die Nanopartikel enthalten, denkbar. Der Einsatz von Leistungsumschall mit einer Intensität oberhalb von  $1 \text{ W/cm}^2$  kann eine Verbesserung der Setzfließmaße um etwa 30 Prozent bewirken [33]. Der entscheidende Vorgang ist hierbei die Kavitation, bei der infolge von Druckschwankungen die Entgasung von Flüssigkeiten stattfindet. Mit zunehmender Feststoffkonzentration in dem flüssigen Medium nimmt die Dispersierung der Partikel ab, die Koagulation wird begünstigt [34]. Die daraus abzuleitende schlechte Eignung für die Suspensionen von (U)HPC mit geringem w/b-Wert werden in [35] bestätigt.

## 2.2 *Rheologie von Beton*

### 2.2.1 Rheologische Modelle

Die Wissenschaft der Fließeigenschaften von Stoffen wird als Rheologie bezeichnet und beschreibt das Fließen von Flüssigkeiten und die Deformation von Festkörpern infolge einer äußeren Kraft [36]. Stoffe, die strukturell physikalisch zwischen einer Flüssigkeit und einem Feststoff einzuordnen sind, werden ebenfalls erfasst. Die Rheologie ermöglicht folglich die Ableitung stoffphysikalischer Gesetzmäßigkeiten [37]. Für eine sehr detaillierte und mit zahlreichen Beispielen versehene Darstellung sei auf [5] verwiesen. Nachfolgend werden nur die, für die vorliegende Arbeit wesentlichen Grundlagen, wiedergegeben.

Für die Darstellung der Zusammenhänge und die Herleitung der rheologischen Größen wird das sogenannte „Zwei-Platten-Modell“ eingesetzt, bei dem sich zwischen zwei plan-parallelen Platten das Volumenelement eines homogenen Körpers befindet [37].

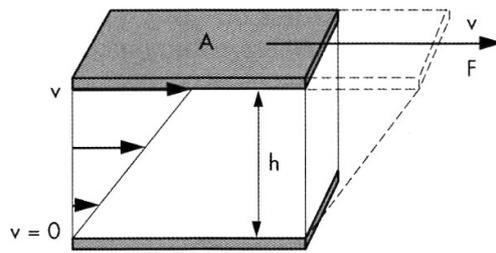


Bild 2.10: Fließgeschwindigkeit einer Flüssigkeit im Spalt des Zwei-Platten-Modells für Scherversuche [5]

Die Kraft  $F$  bewirkt die Verschiebung der oberen Platte mit der Fläche  $A$  im Abstand  $h$  von der unbeweglichen unteren Platte mit einer konstanten Geschwindigkeit  $v$ . Zur Bestimmung des rheologischen Stoffverhaltens werden - unter der Annahme laminarer, stationärer Schichtenströmungen - physikalische Parameter definiert. Die Bewegung einer solchen Schicht bewirkt infolge von Kohäsionskräften die Verschiebung der angrenzenden Schichten und wird als „Scherung“ bezeichnet (Bild 2.11).

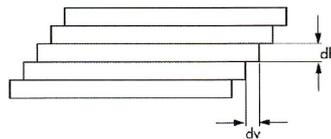


Bild 2.11: Ebene, schichtenförmige (laminare) Strömung einer Flüssigkeit [5]

Die Schubspannung  $\tau$  [ $\text{N/m}^2$  oder Pa] berechnet sich nach Gl. 2.9 aus dem Quotienten der Scherkraft  $F$  [N] und der Scherfläche  $A$  [ $\text{m}^2$ ].

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (\text{Gl. 2.9})$$

Die Scherrate  $\dot{\gamma}$  [ $\text{s}^{-1}$ ] ist als der Quotient aus der Geschwindigkeit  $v$  [m/s] und dem Abstand  $h$  [m] definiert.

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{h} \quad (\text{Gl. 2.10})$$

Die dynamische Viskosität, die die Zähigkeit einer Probe beschreibt, ergibt sich als Quotient aus der Schubspannung und der Scherrate [37].

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (\text{Gl. 2.11})$$

Bei der Viskositätsfunktion werden die rheologischen Stoffeigenschaften als dynamische Viskosität über die Scherrate, bei der Fließkurve die Schubspannung über die Scherrate abgebildet (Bild 2.12).

Ist die dynamische Viskosität konstant und somit unabhängig von der Scherrate (z.B. Wasser), handelt es sich um ein newtonsches Fließverhalten (Gl. 2.12).

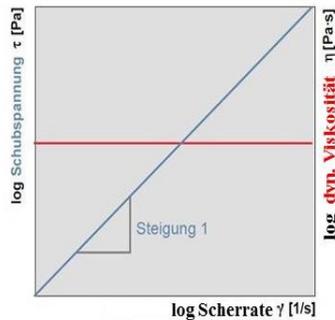


Bild 2.12: Viskositäts- und Fließfunktion einer newtonschen Flüssigkeit [38]

Die Viskosität entspricht der Steigung der zugehörigen Fließkurve.

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (\text{Gl. 2.12})$$

Verringert sich mit steigender Scherrate die dynamische Viskosität, handelt es sich um ein strukturviskoses Fließverhalten (Gl 2.13).

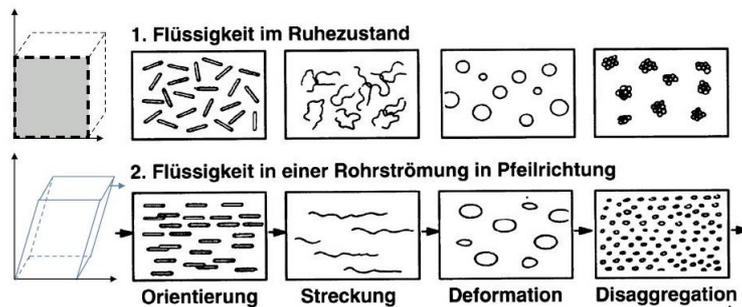


Bild 2.13: Orientierung, Streckung, Deformation und Deagglomeration der Struktur [38]

Ursächlich ist die in Bild 2.13 dargestellte Orientierung, Streckung, Deformation oder Deagglomeration der Probenstruktur.

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad n < 1 \quad (\text{Gl. 2.13})$$

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad n > 1 \quad (\text{Gl. 2.14})$$

Wie in Bild 2.14 ersichtlich, steigt die dynamische Viskosität bei dilatantem Fließverhalten (Gl. 2.14) mit steigender Scherrate an. Die dynamische Viskosität ist bei strukturviskosem oder dilatantem Fließverhalten somit keine Stoffkonstante und wird bei solchen nicht-newtonschen Stoffen auch als „scheinbare Viskosität“ bezeichnet [37].

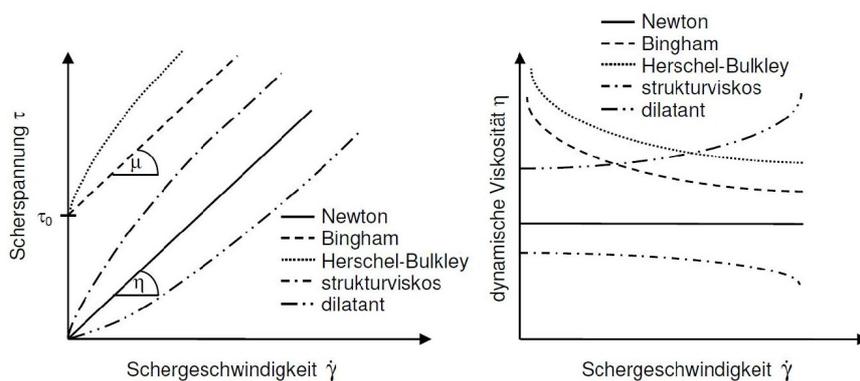


Bild 2.14: Qualitativer Verlauf bedeutender Fließ- (links) und Viskositätsfunktionen (rechts) für unterschiedliches rheologisches Stoffverhalten [9]

In Bild 2.14 sind zudem die Fließ- und Viskositätsfunktionen eines Bingham-Körpers und eines Herschel-Bulkley-Körpers dargestellt. Deren Schnittpunkt der Fließkurve mit der  $\tau$ -Achse verläuft nicht durch den Koordinatenursprung. Erst wenn der charakteristische Grenzwert für die Fließgrenze  $\tau_0$  überschritten wird, beginnen diese zu fließen. Die Fließgrenze (Bild 2.15) ist definiert als diejenige Schubspannung, die erforderlich ist, um den Übergang vom elastischen Verhalten zum stationären Fließen zu erreichen [38].

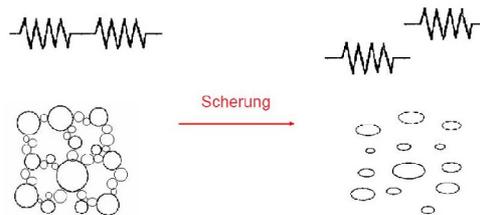


Bild 2.15: Modellvorstellung der Fließgrenze [38]

Die lineare Bingham-Fließkurve wird durch Gleichung 2.15 mit der Fließgrenze  $\tau_0$  und die plastische Viskosität  $\mu$  (Gl. 2.16) beschrieben:

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (\text{Gl. 2.15})$$

$$\mu = \frac{\tau - \tau_0}{\dot{\gamma}} \quad (\text{Gl. 2.16})$$

Bei einem nichtlinearen Verlauf der Fließkurve mit Fließgrenze findet das Model nach Herschel-Bulkley (Gl. 2.17) Anwendung, das jedoch nicht physikalisch hinterlegt ist [39]. Die für dieses Model erforderlichen Konstanten werden überschlägig - oder aber empirisch - ermittelt.

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (\text{Gl. 2.17})$$

**Zeitabhängigkeit von Fließ- und Viskositätsfunktionen**

Wie in Abb. 2.16 erkennbar, kann sich die dynamische Viskosität bei einer konstanten Scherbelastung zeitabhängig verändern. Das bei Betonen relevante thixotrope Verhalten wird in der DIN 1342-1 [40] angegeben:

*„Thixotrope Stoffe zeigen ein zeitabhängiges Fließverhalten, bei dem die Viskosität infolge andauernder mechanischer Beanspruchung vom Wert im Ruhezustand her gegen einen Endwert hin abnimmt und nach Aufhören der Beanspruchung wieder zunimmt.“*

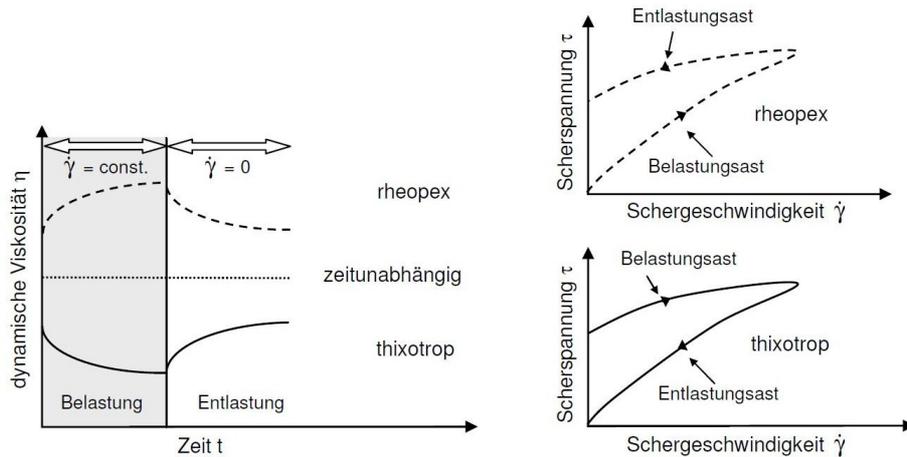


Bild 2.16: Zeitabhängigkeit bei konstanter Scherbelastung der dynamischen Viskosität zweier Stoffe im Vergleich zu einer zeitunabhängigen Newton-Flüssigkeit (links) sowie der sich daraus ergebenden Beeinflussung der entsprechenden Fließfunktionen (rechts) [9]

Die zeitabhängige Abnahme der Viskosität ist auf den in Bild 2.17 dargestellten internen Strukturabbau infolge mechanischer Einwirkung zurückzuführen. Die nach dem Strukturabbau durch Extrapolation der Fließkurve bestimmte Fließgrenze wird als die dynamische Fließgrenze  $\tau_0$  bezeichnet, da sie an einem im Fließen befindlichen Material bestimmt wird.

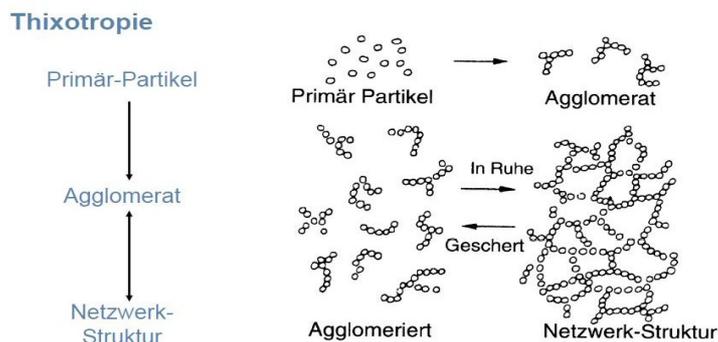


Bild 2.17: Abhängigkeit der Viskosität von der Scherzeit [38]

Der Strukturaufbau erfolgt bei Frischbeton bereits wenige Minuten nachdem die Ruhephase eingesetzt hat [41], [42]. Ein erneutes Fließen setzt erst nach Überwindung der sogenannten statischen Fließgrenze  $\tau_y$  (Ruhe-Fließgrenze  $\tau_{0,r}$ ) des ruhenden Materials ein (Bild 2.18), die bis zum 6-fachen der dynamischen Fließgrenze betragen kann [9].

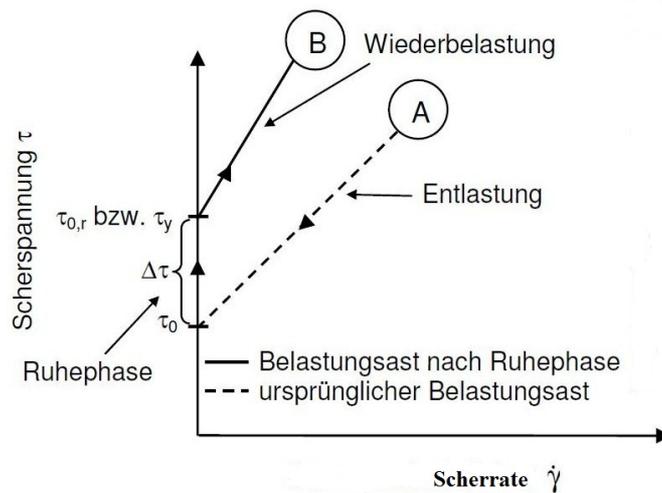


Bild 2.18: Zeitliche Entwicklung der statischen Fließgrenze [9]

Das thixotrope Verhalten eines Betons und somit die Höhe der dynamischen und der statischen Fließgrenze sind nach [43] vorrangig abhängig von der Mischungszusammensetzung. Für einen selbstverdichtenden Beton wird eine Differenz  $\Delta\tau = \tau_y - \tau_0$  von 423 Pa genannt. Verfügt der Beton nicht über selbstverdichtende Eigenschaften, beeinflusst zudem der Verdichtungsgrad (die Partikel-Packung) des Frischbetons die Differenz zwischen den Fließgrenzen [42].

Um die zeitliche Entwicklung des Strukturaufbaus zu beschreiben, wurde in [9] mit dem Strukturaufbaukoeffizienten  $C_{thix}$  ein linearer Zusammenhang zwischen der statischen Fließgrenze und der Ruhezeit [s] ermittelt. Darauf aufbauend nimmt [44] bei Frischbetonen eine Einteilung in nicht-thixotrop ( $c_{thix} < 0,1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ), thixotrop ( $0,1 \text{ Pa}\cdot\text{s} \leq C_{thix} \leq 0,5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ) und hochthixotrop ( $C_{thix} > 0,5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ) vor.

$$\tau_y(t_r) = \tau_{0,i} + C_{thix} \cdot t_r \quad (\text{Gl. 2.18})$$

Die Auswirkungen der Belastungsdauer bei konstanter Scherrate auf das thixotrope Verhalten wurden von WALLEVIK [45] in Bild 2.19 aufgezeigt.

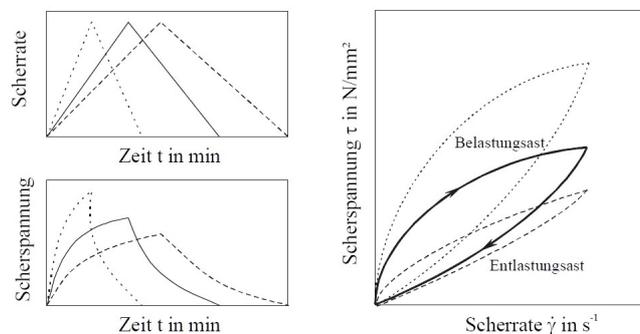


Bild 2.19: Schematische Darstellung thixotropen Verhaltens in Abhängigkeit von der Belastungsdauer [45]

Der Einfluss der Belastungsgeschichte auf die Höhe der statischen Fließgrenze wurde von [46] untersucht. Dabei wurden bei Proben mit vorausgegangenem Strukturbruch höhere Werte gemessen, als bei unbelasteten Proben.

Als ursächlich gilt die sogenannte „Dehnungsverfestigung“, welche die interpartikulären Wechselwirkungen bei einer Belastung deutlich erhöht.

Eine Mess- und Auswertemethode zur Bewertung des thixotropen Verhaltens ist die Bestimmung der sogenannten Hysterese-Fläche zwischen der Auf- und Abwärtskurve im Fließversuch (Bild 2.20). MEZGER [5] gibt zu bedenken, dass bei dieser Messmethode das Fließverhalten nur im Bewegungszustand erfasst wird. Aussagen zum Strukturaufbau in der Ruhephase sind folglich nicht möglich.

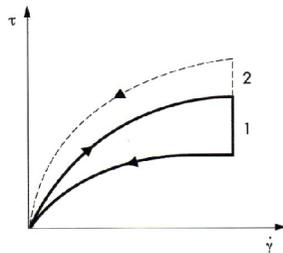


Bild 2.20: Bestimmung der Hysterese-Fläche zwischen Auf- und Abwärtskurve [5]

HAIST [39] macht auf eine grundsätzliche Problematik bei der Anwendung der beschriebenen Modelle nach Bingham und Herschel-Bulkley aufmerksam. Diese betrachten - wie weitere Modelle nach vom Berg, Windhab, und Cross - das untersuchte Material als homogene Substanz. Unter Berücksichtigung der Ausgangsstoffe ist eine Anpassung der Modellparameter und somit eine Vorhersage des Verformungsverhaltens möglich. Die Vorhersage hat bei diesen Kontinuumsmodellen jedoch Prognosecharakter, da in der Regel keine physikalische Grundlage dafür existent ist. Partikel-Modelle, wie das nach COSTA [47], berücksichtigen die physikalischen Wechselwirkungen der Partikel untereinander und mit der umgebenden Suspension. Sind die Ausgangsstoffe mit ihren Materialeigenschaften charakterisiert, ist eine Prognose der rheologischen Eigenschaften mit geringeren Ungenauigkeiten behaftet. Die Anwendung der Partikel-Modelle ist nach HAIST [39] jedoch in der Regel sehr komplex.

Eine weitere Möglichkeit viskoelastische Substanzen zu charakterisieren, ermöglichen Oszillationsversuche, bei denen die Scherbeanspruchung harmonisch-periodisch über die Zeit verändert wird. Die unter dieser instationären Randbedingung ermittelten Messwerte sind somit nicht direkt auf klassische Rotationsversuche übertragbar, die ausdrücklich stationäre Bedingungen voraussetzen [5]. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, werden Materialparameter mit einem \* dargestellt. Der Oszillationsversuch lässt sich ebenfalls am Zwei-Platten-Modell veranschaulichen (Bild 2.21):

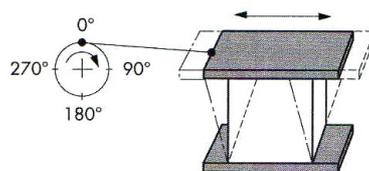


Bild 2.21: Scherung einer Messprobe mit dem Zwei-Platten-Modell für Oszillationsversuche [5]

Während die untere Platte unbeweglich ist, erfolgt die Auslenkung  $\pm s$  mit dem Auslenkwinkel  $\pm \varphi$  der oberen Platte gemäß der Sinus-Kurve durch eine Kraft  $\pm F$ . Daraus ergeben sich die Schubspannung  $\pm \tau$  (Pa)  $= \pm F/A$  und die Deformation  $\pm \gamma = \pm s/h$  (Bild 2.22). Gültig sind diese Annahmen nur, wenn sich das untersuchte Material über die Höhe  $h$  des Messspaltes homogen verformt und Wandhaftung zu den Platten vorhanden ist. Die Schwingungsanregung wird bei einem Rheometer in der Regel elektronisch gesteuert und der zeitabhängige Strom des Antriebs zur Bestimmung des Drehmoments genutzt. Der Auslenkwinkel wird durch einen opto-elektronischen, inkrementalen Positionssensor erfasst [5].

Nachfolgend werden zwei Grenzzustände am Zwei-Platten-Modell aufgezeigt. Die resultierende Kraft  $F(t)$  wird hierbei an der unteren Platte gemessen. Gemäß der instationären Scherbeanspruchung sind alle Werte zeitabhängig. Zeigt das im Oszillationsversuch beanspruchte Material ein **idealelastisches** Verhalten, gilt das hookesche Gesetz mit dem komplexen Schubmodul  $G^*$  und den zeitabhängigen Werten der Sinusfunktion von  $\tau$  und  $\gamma$ .

$$\tau(t) = G^* \cdot \gamma(t) \quad (\text{Gl. 2.19})$$

In den Winkelpositionen  $0^\circ$  ( $360^\circ$ ) und  $180^\circ$  (Bild 2.21) beträgt die Auslenkung  $s=0$  (Nullposition; Bild 2.22). Sowohl die Scherdeformation  $\gamma(t)$  als auch die Schubspannung  $\tau(t)$  sind folglich ebenfalls null, während die Scherrate (Bewegungsgeschwindigkeit)  $\dot{\gamma}(t)$  maximal ist.

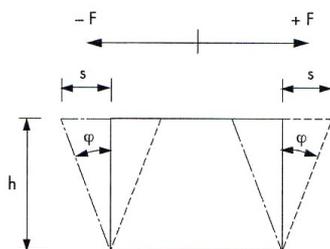


Bild 2.22: Oszillationsversuch: Scherkraft  $\pm F$ , Auslenkung  $\pm s$  und Auslenkwinkel  $\pm \varphi$  im Scherspalt  $h$  [5]

In der Winkelposition  $90^\circ$  ist die Auslenkung  $s$  der oberen Platte nach rechts (positiv) maximal und führt ebenfalls zur maximalen positiven Scherdeformation und Schubspannung. Aufgrund des Richtungswechsels ist die Scherrate null ( $\dot{\gamma}(t)=0$ ). In der Winkelposition  $270^\circ$  ist die Auslenkung  $s$  der oberen Platte nach links (negativ) maximal und führt zur maximalen negativen Scherdeformation und Schubspannung. Die Scherrate ist aufgrund des erneuten Richtungswechsels auch hier null.

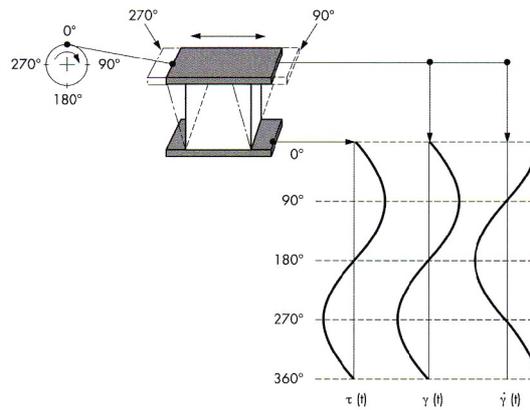


Bild 2.23: Idealelastisches Verhalten im Oszillationsversuch [5]

Die Schubspannungs- und die Scherdeformations-Kurven verlaufen also gleichzeitig sinusförmig mit der selben Frequenz. Die Kurve der Scherrate verläuft sinusförmig mit einem Versatz von 90°.

Bei **idealviskosen** Materialien gilt das newtonsche Gesetz.

$$\tau(t) = \eta^* \cdot \dot{\gamma}(t) \tag{Gl. 2.20}$$

Aufgrund der instationären Bedingungen während der Oszillation sind die Schubspannung  $\tau(t)$  und die Scherrate  $\dot{\gamma}(t)$  auch hier zeitabhängig. Da es sich bei der komplexen Viskosität  $\eta^*$  um eine Konstante handelt, verlaufen die Schubspannung und die Scherrate phasengleich.

In den Winkelpositionen 90° und 270° sind die Scherraten infolge Richtungswechsel erneut null (Bild 2.24) und unter Anwendung des newtonschen Gesetzes (Gl. 2.20) auch die zugehörigen Schubspannungen. Die Scherdeformationen sind in diesen Winkelpositionen hingegen maximal. In den Winkelpositionen 0° (360°) und 180° sind die Scherraten und somit auch die Schubspannungen maximal. Da die Auslenkung null ist, ist die Scherdeformation ebenfalls null.

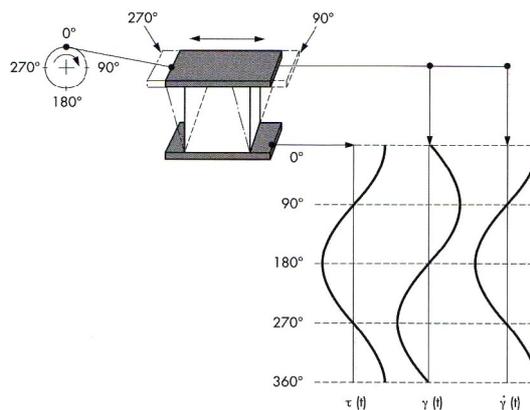


Bild 2.24: Idealviskoses Verhalten im Oszillationsversuch [5]

Idealelastische Materialien sind im Oszillationversuch dadurch gekennzeichnet, dass die vorgegebene Scherdeformations-Kurve phasengleich mit der Schubspannungskurve verläuft, der Phasenverschiebungswinkel  $\delta=0^\circ$  ist. Idealviskose Materialien hingegen weisen einen Phasenverschiebungswinkel  $\delta=90^\circ$  zwischen der Anregungskurve und der Ergebnisskurve auf (Bild 2.25). Bei viskoelastischem Verhalten ist  $0^\circ < \delta < 90^\circ$ .

**Vorgabe:**

Schubspannung  $\tau$  (CS)  
bzw. Deformation  $\gamma$  (CD)

**Antwort:**

Deformation  $\gamma$  bzw.  $\tau$   
Phasenverschiebung  $\delta$

- rein elastisch  
 $\delta = 0^\circ$
- rein viskos  
 $\delta = 90^\circ$

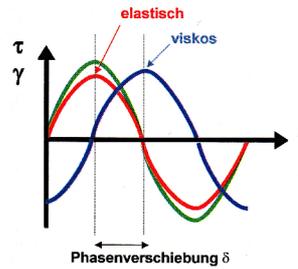


Bild 2.25: Phasenverschiebung im Oszillationsversuch [38]

Der komplexe Schubmodul  $G^*$  ergibt sich nach dem hookeschen Gesetz bei Oszillationsversuchen aus der zeitabhängigen Schubspannung  $\tau(t)$  und der Scherdeformation  $\gamma(t)$ .  $G^*$  beschreibt die viskoelastischen Eigenschaften und kann vektoriell in den Speichermodul  $G'$  (elastischer Anteil) und dem Verlustmodul  $G''$  (viskoser Anteil) zerlegt werden (Bild 2.26).

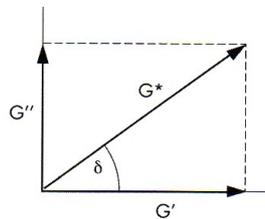


Bild 2.26: Vektordiagramm mit  $G'$ ,  $G''$  und dem resultierenden Vektor  $G^*$  [5]

Bei der praktischen Umsetzung von Oszillationsversuchen kann zwischen zwei Methoden unterschieden werden:

**Controlled shear deformation (CSD)**

Die vorgegebene Deformation der Probe ( $\gamma_{\text{Amplitude}}$ ) bzw. der Drehwinkel ( $\varphi_{\text{Amplitude}}$ ) werden vom Anwender vorgegeben und gemäß der nachfolgenden Sinuskurven vom Rheometer umgesetzt.

$$\gamma(t) = \gamma_A \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad \text{bzw.} \quad \varphi(t) = \varphi_A \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (\text{Gl. 2.21})$$

Als Messergebnis wird die um den Phasenverschiebungswinkel  $\delta$  verschobene Drehmomentkurve erfasst und die von der Werkzeuggeometrie abhängige Schubspannung berechnet.

$$M(t) = M_A \cdot \sin(\omega \cdot t + \delta) \quad \text{bzw.} \quad \tau(t) = \tau_A \cdot \sin(\omega \cdot t + \delta) \quad (\text{Gl. 2.22})$$

**Controlled shear stress test (CSS)**

Die vorgegebene Schubspannung ( $\tau_{\text{Amplitude}}$ ) bzw. das Drehmoment ( $M_{\text{Amplitude}}$ ) werden vom Rheometer mit sinusförmigem Verlauf auf die Materialprobe aufgebracht.

$$M(t) = M_A \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad \text{bzw.} \quad \tau(t) = \tau_A \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (\text{Gl. 2.23})$$

Der Verlauf der resultierenden Scherdeformation bzw. des Drehwinkels sind um den Phasenverschiebungswinkel verschoben und ermöglichen die Berechnung des elastischen und des viskosen Anteils der Deformation.

$$\varphi(t) = \varphi_A \cdot \sin(\omega \cdot t + \delta) \quad \text{bzw.} \quad \gamma(t) = \gamma_A \cdot \sin(\omega \cdot t + \delta) \quad (\text{Gl. 2.24})$$

### Amplituden-Test

Eine Erweiterung des Oszillationsversuches stellt der Amplitudentest, auch als Amplituden-Sweep bezeichnet, dar. Unter Vorgabe der Deformation (bzw. des Drehwinkels) steigt die Amplitude  $\gamma(t)_{\text{Amplitude}}$  (bzw.  $\varphi(t)_{\text{Amplitude}}$ ) mit der Zeit  $t$  an. Während die Frequenz konstant ist, erhöht sich die Auslenkung  $s$  kontinuierlich.

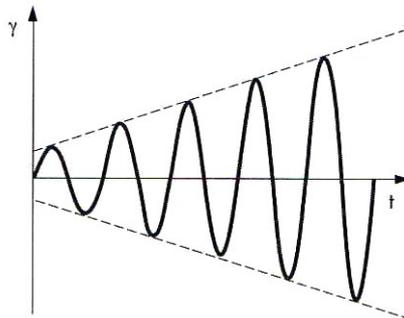


Bild 2.27: Amplituden-Test unter Vorgabe der Deformation [5]

Wird die Schubspannung vorgegeben, wird diese – ebenfalls unter Beibehaltung der Frequenz – kontinuierlich gesteigert. Nach [5] liefern Versuche mit Schubspannungsvorgabe häufig weniger frequenzabhängige Messwerte.

Die im Amplituden-Test ermittelten Messergebnisse ermöglichen eine von der Belastung abhängige Charakterisierung des viskoelastischen Materialverhaltens. Werden die Deformationsvorgaben (CSD) bzw. die Schubspannungsvorgaben (CSS) und die aus den Messwerten berechneten Speicher- und Verlustmoduli ( $G'$  und  $G''$ ) wie in Bild 2.28 dargestellt, lassen sich Aussagen zum Strukturcharakter machen. Bei sehr kleinen Amplituden verlaufen  $G'$  und  $G''$  auf einem konstanten, aber im Regelfall unterschiedlichen Niveau. In Bild 2.28 verläuft  $G'$  oberhalb von  $G''$ , es dominiert das elastische Verhalten. In diesem Bereich mit sehr geringer Scherbelastung zeigt die Struktur eine gewisse Steifigkeit und besitzt einen Gel-Charakter. Dominiert hingegen das viskose Verhalten, verläuft  $G'$  unterhalb von  $G''$  und das Material besitzt Flüssigkeits-Charakter. Solange  $G'$  und  $G''$  konstant bleiben, ist die Prüfung zerstörungsfrei, da die Struktur nicht irreversibel gestört wird (linear-viskoelastischer Bereich; kurz: LVE-Bereich).

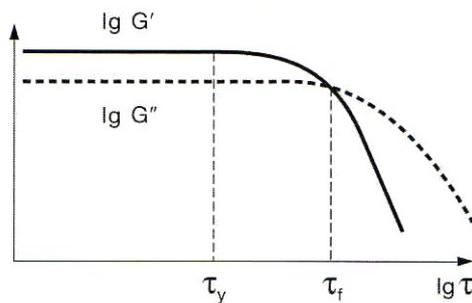


Bild 2.28: Amplituden-Test als Schubspannungsfunktion [5]

Der Grenzwert der Schubspannung  $\tau_y$  (yield point), der zur Überschreitung des linear-viskosen Bereiches führt, wird als Nachgebrenze bezeichnet. Das Material besitzt weiterhin Gel-Charakter, da  $G'$  und somit der elastische Anteil über den viskosen Anteil  $G''$  dominiert. Erst am Schnittpunkt von  $G'$  mit  $G''$  findet ein Wechsel hin zum Flüssigkeits-Charakter statt. Dieser Punkt legt die in der Rheologie von Beton übliche Fließgrenze  $\tau_f$  (flow point) fest, der im englischen Sprachraum missverständlicher Weise auch als „yield point“ bezeichnet wird. Die Werte von  $\tau_y$  und  $\tau_f$  weichen nach [5] signifikant voneinander ab und können die zugehörige Scherrate um mehr als den Faktor 10 beeinflussen. Für die Auswertung ist also im Vorfeld festzulegen, ob die Grenze des linear-viskosen Bereiches oder der Punkt bestimmt werden soll, an dem das Material durch weitgehenden Zusammenbruch der inneren Struktur zu fließen beginnt [5].

### Untersuchungen zum thixotropen Verhalten

Oszillationsmessungen mit sprunghafter Änderung der Scherdeformation bzw. der Schubspannung ermöglichen Aussagen zur Thixotropie einer Substanz. Gegenüber Rotationsversuchen ermöglicht die Bestimmung von  $G'$  und  $G''$  zusätzliche Angaben über die Struktur des Materials. Im 1. und 3. von drei Abschnitten wird das Material bei niedriger Scherdeformation bzw. niedrigem Drehmoment im linear-viskoelastischen Bereich geschert (Ruhescherung). Der Speichermodul  $G'$  und der Verlustmodul  $G''$  verlaufen dabei auf nahezu konstantem Niveau. Der am Ende des ersten Abschnittes gemessene Speichermodul dient als Bezugspunkt für die Berechnungen des sogenannten Thixotropiewertes.

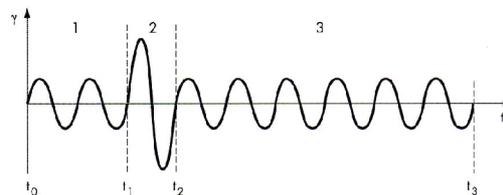


Bild 2.29: Vorgabeprofil mit unterschiedlichen Deformationsamplituden [5]

Im mittleren Abschnitt wird die Amplitude auf Werte außerhalb des linear-viskoelastischen Bereichs gesteigert, woraufhin  $G'$  und  $G''$  auf ein Minimum abfallen. Im 3. Abschnitt erfolgt, unter der Ruhescherung aus Abschnitt 1, eine Strukturерholung.

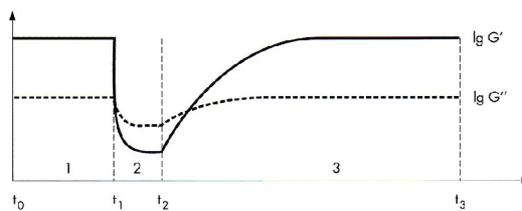


Bild 2.30: zeitabhängige Funktionen von  $G'$  und  $G''$  einer thixotropen Substanz [5]

Der Thixotropiewert wird als Differenz aus  $G'$  am Ende von Abschnitt 1 und  $G'$  am Ende von Abschnitt 2 bestimmt. Im dritten Messabschnitt verstreicht die Zeit  $t$  zwischen  $G'$  min zu Beginn und  $G'$  max nach der Struktur-erholung. Dieser Zeitraum wird als materialabhängige Thixotropiezeit bezeichnet.

## 2.2.2 Rheometer

Als Rotations-Rheometer wird ein Messgerät bezeichnet, das drehzahl- bzw. scherraten-gesteuerte und drehmoment- bzw. schubspannungsgesteuerte Rotationsversuche durchführen kann [5], um physikalische Materialgesetze in Form von rheologischen bzw. rheometrischen Parametern zu ermitteln. Bei Rotations- und Oszillationsversuchen kann zwischen zwei Betriebsarten unterschieden werden. Bei der vornehmlich eingesetzten Searl-Methode wird der Messkörper angetrieben und der Messbecher als Stator steht still. Bei der Couette-Methode hingegen erfolgt eine mechanische Trennung zwischen dem Messkörper mit Drehmoment-Sensor und dem angetriebenen Messbecher [38].

Für Flüssigkeiten finden in Abhängigkeit von der Viskosität Messgeometrien Anwendung, die die Berechnung rheologischer Parameter in absoluten Einheiten ermöglichen. Bei den in Bild 2.31 beispielhaft dargestellten Messkörpern sind die dazu erforderlichen Oberflächen und Spalte genau definiert.

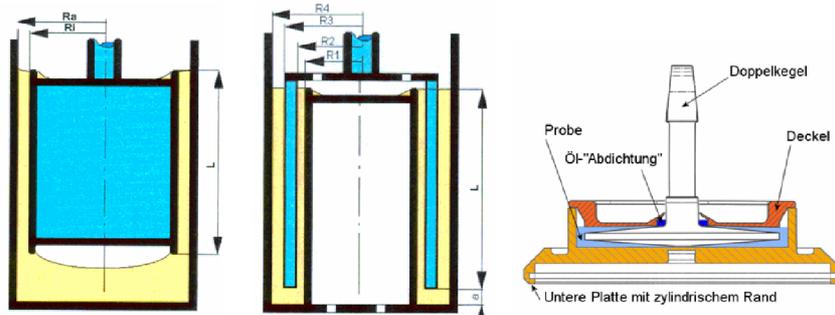


Bild 2.31: Messgeometrien zur Bestimmung rheologischer Parameter in absoluten Einheiten; konzentrische Zylinder nach DIN 53018 (links), Doppelspalt Zylinder nach DIN 54453 (Mitte) und Doppelkegel (rechts) [38]

Materialien wie Mörtel und Beton, die große Partikel enthalten, lassen sich nicht in den absoluten Messeinrichtungen vermessen. BANFILL [48] nennt zwei grundlegende Forderungen an die Messapparatur und das Probevolumen zur Durchführung rheologischer Messungen. Der Scherspalt muss mindestens das Zehnfache des Größtkorn-Durchmessers betragen und das Verhältnis aus dem Radius des äußeren Zylinders zum Radius des inneren Zylinders muss kleiner 1,2 sein. Das Probevolumen für ein Koaxial-Zylinder-Messsystem betrage unter Einhaltung dieser Vorgaben für Beton  $2,5 \text{ m}^3$ .

Einen für die vorliegende Arbeit relevanten Ansatz zur Bestimmung rheologischer Parameter in absoluten Einheiten - unter Verwendung relativer Messeinrichtungen - beschreibt TATTERSALL [49]. Für den sogenannten Tattersall Two-Point Test (IBB Concrete Rheometer) werden die Gleichungen 2.25 zur Berechnung der rheologischen Parameter in absoluten Einheiten angegeben:

$$\tau_0 = \frac{g}{\frac{G}{K}} \quad \text{und} \quad \eta = \frac{h}{G} \quad (\text{Gl. 2.25})$$

G ist eine Konstante, die durch Kalibrierung an einer newtonschen Flüssigkeit bestimmt wurde und K eine Konstante, die durch Kalibrierung an einer nicht-newtonschen Flüssigkeit ermittelt wurde. Während des Messvorgangs wird das Drehmoment über die Geschwindigkeit der Messeinrichtung dargestellt und aus diesem linearen Zusammenhang werden die Steigung h der Geraden und das Drehmoment g bei der Geschwindigkeit null bestimmt. Nach [6] ist es jedoch kaum möglich die Konstanten G und K zu bestimmen, da die Strömung im Gerät nicht linear ist. Zudem wird angezweifelt, dass der Messkörper mit seinen geringen Abmessungen in der Lage ist, die newtonsche Flüssigkeit ohne grobe Partikel im gesamten Behälter zu scheren. Ebenso gibt es keine nicht-newtonsche Substanz mit der die Konstante K allgemeingültig kalibriert werden könnte.

MEZGER [5] bewertet den Einsatz relativer Messsysteme zur Berechnung rheologischer Parameter in absoluten Einheiten. Das angesprochene Spindel-Messsystem verfügt zwar über definierte Scherflächen, aber die Scherrate kann nicht bestimmt werden, da es keinen engen Scherspalt gibt:

*„Es ist zwar nach vielen vergleichenden Versuchen möglich, eine ungefähre, grobe Korrelation zwischen Versuchsergebnissen zu finden, die einerseits mit einer bestimmten Spindel und andererseits mit einem bestimmten ISO-Messsystem erzielt wurden. Dieser Umrechnungsfaktor gilt dann aber nur für diese zwei Messgeometrien und nur bei dieser Messflüssigkeit und außerdem auch nur dann, wenn diese idealviskoses Fließverhalten zeigt. Mit nicht-newtonschen Substanzen wird man keine Wiederholbarkeit erwarten können, und bei verschiedenen Drehzahlen erst recht nicht.“*

Alle in [10] benannten Beton-Rheometer sind in der Lage, Betone hinsichtlich Fließgrenze und plastischer Viskosität in der richtigen Reihenfolge einzuordnen. Dennoch liefern diese nicht identische Werte für die rheologischen Parameter in absoluten Einheiten. Nach [7] ist es zudem nicht möglich festzulegen, welches Rheometer die tatsächlichen Werte am besten wiedergibt. Nach Auffassung des Autors wird in jedem Rheometer mindestens eine Randbedingung zur Bestimmung von Absolutwerten nicht eingehalten. Für das BTRheom werden Unwägbarkeiten bezüglich Wandgleiten des Betons im Behälter, für das BML ein zu enger Scherspalt und für den Zwei-Punkt-Test Unsicherheiten bezüglich des beanspruchten Volumens benannt.

Mix- ture #	BML		BTRHEOM		CEMAGREF- IMG*		IBB		Two-Point	
	Yield stress	Plastic Viscosity	Yield stress	Plastic Viscosity	Yield stress	Plastic Viscosity	Yield stress	Plastic Viscosity	Yield stress	Plastic Viscosity
	Pa	Pa·s	Pa	Pa·s	Pa	Pa·s	N·m	N·m·s	Pa	Pa·s
1	738	114	1619	181	1832		10.84	14.72	919	61
2	76	17.4	406	18	437	3	0.34	5.34	80	13
3	408	82.4	771	136			3.67	13.20	314	83
4	840	72	2139	51	2138		7.44	11.65	1059	
5	910	108	1753	94			3.91	14.61	698	19
6	139	45	505	78	487	63	1.80	10.31	145	41
7	90	32.7	549	54	410	43	0.86	9.31	98	38
8	717	29	1662	67	1417		5.71	8.84	689	22
9	125	15	624	25	504	3	0.95	6.06	159	19
10	248	35.9	740	50	535	43	1.98	8.88	253	19
11	442	29	1189	27	1034	21	3.97	6.57	516	16
12	584	39	1503	38	929	47	6.23	9.07	525	22

Bild 2.32: Mit fünf Rheometern an 12 verschiedenen Betonen gemessene rheologische Parameter in absoluten Einheiten [10]

### 2.2.3 Frischbetonversuche

Obwohl Rheometer in der Lage sind, einen Beton durch die zwei unabhängigen (absoluten) Parameter Fließgrenze und plastische Viskosität nach dem Bingham-Modell zu beschreiben, werden in der Baustellenpraxis die schnellen, günstigen und einfachen Frischbetonversuche bevorzugt. Der in der vorliegenden Arbeit untersuchte HVFA-Beton wird im Setzfließversuch nach DIN EN 12350-8 in die Setzfließmaßklasse SF3 und in die Viskositätsklasse VS2 eingestuft. In die so bestimmten Messwerte gehen die Fließgrenze und die plastische Viskosität „verschmiert“ ein [9], die rheologischen Parameter können durch einen solchen Ein-Punkt-Versuch jedoch nicht in der gewünschten Eindeutigkeit differenziert werden. Abhängig vom Versuchsaufbau liefern Frischbetonversuche folglich eher Aussagen zur Fließgrenze (z.B. Setzfließversuch oder Ausbreitmaßversuch) oder wie beispielsweise der Trichterauslaufzeit-Versuch zur Viskosität.

ROUSSEL et al. [8] veröffentlichten für den ASTM-Mini-Konus eine analytische Lösung zur Berechnung der Fließgrenze von Zementleimen, die empirisch und mit einem Leim-Rheometer bestätigt werden konnte. In [7] wurde aufgezeigt, dass dies nicht auf den Setzfließmaßversuch für SVB übertragen werden kann. Um die Fluidmechanik zur Berechnung des Fließvorganges anwenden zu dürfen, muss die Höhe des betrachteten Materialstroms nach [50] mindestens dem Fünffachen des größten Partikel-Durchmessers entsprechen. Diese Randbedingung ist nicht erfüllt und führt zu der in Bild 2.33 dargestellten Situation. Die untersuchten SVB unterscheiden sich bezüglich des Größtkorn-Durchmessers und verfügen über ein gemessenes Setzfließmaß von  $750 \pm 50$  mm, während die mit einem Rheometer bestimmten Fließgrenzen um bis zu Faktor 5 voneinander abweichen. Betone mit niedriger Fließgrenze erreichen kein höheres Setzfließmaß, da durch den hohen Größtkorn-Durchmesser der Fließvorgang vorzeitig zum Stillstand kommt. So ergeben sich durch das geringe Probevolumen ähnliche Messwerte im Setzfließversuch, obwohl die tatsächlichen Fließgrenzen erheblich voneinander abweichen. Nach Berechnungen von [7] wäre für den Setzfließversuch ein Probevolumen von 300 l erforderlich, um diesen Einfluss vernachlässigen zu können.

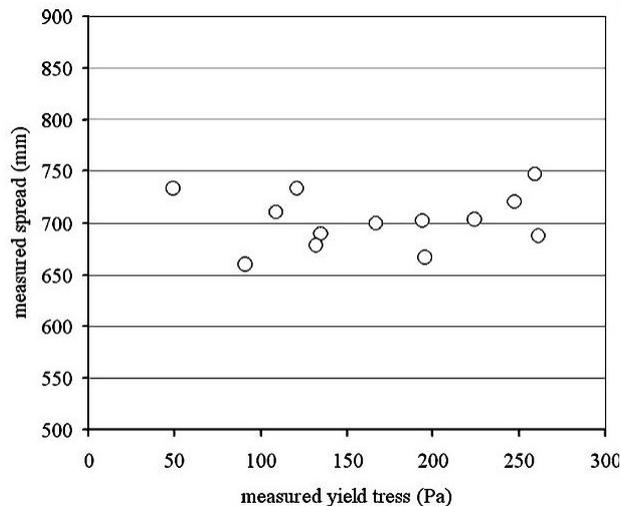


Bild 2.33: Fließgrenzen verschiedener SVB gemessen mit dem Rheometer BTRHEOM, gemessene Setzfließmaße aller SVB:  $700 \pm 50$  mm [7]

[51] macht darauf aufmerksam, dass die mit einem Marsh-Trichter bestimmten Auslaufzeiten einer Zement-Suspensionen infolge der Gravitation lediglich qualitativen Charakter haben. Während Suspensionen mit geringer Viskosität schnell und somit bei einer hohen Scherrate aus dem Trichter fließen, ist die Scherrate bei höherviskosen Materialien durch das langsamere Ausfließen geringer. Nach [5] gilt:

*„Bei Fluiden mit nicht-newtonschem Fließverhalten gelangt man mit diesen einfachen Messgeräten jedoch zu Ergebnissen, die dieses komplexere Verhalten nicht wirklich widerspiegeln.“*

ROUSSEL [7] beschreibt einen Frischbetonversuch mit dem die Fließgrenze als Absolutwert bestimmt werden kann. Dieser Versuchsaufbau wurde in der vorliegenden Arbeit erweitert [Kapitel 5.1 LCPC Box], um reproduzierbare Werte für die Viskosität bestimmen zu können.

### 2.2.4 Einfluss der Mischtechnik auf die Rheologie von Beton

In [52] wurden die Auswirkungen der Mischtechnik auf die Frischbetoneigenschaften von SVB, Grobkorn-UHPC und Feinkorn-UHPC bei vorgegebener Mischdauer untersucht. Neben einem Intensiv-Mischer Typ Eirich kam ein Zyklus-Mischer zum Einsatz, der das Mischgut über ein exzentrisch angebrachtes Mischkreuz vermennt und den drehbar gelagerten Mischbehälter durch das als „Kupplung“ wirkende Mischgut im Gleichlauf mitschleppt. Beim Intensiv-Mischer wurden neben der Werkzeuggeschwindigkeit auch das Mischwerkzeug variiert. Sowohl die Mischdauer (120 s Nassmischzeit) als auch die Mischintensität waren im Zyklus-Mischer nicht ausreichend, um die Eigenschaften der im Eirich-Mischer hergestellten Betone zu erreichen.

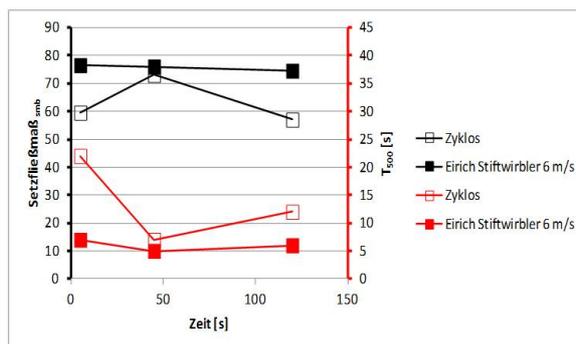


Bild 2.34: Frischbetonkennwerte eines SVB, hergestellt in einem Zyklus- und einem Eirich-Mischer nach [52]

Einer Phase der Nachverflüssigung und Verminderung der Viskosität des im Zyklus-Mischer hergestellten SVB folgte der ausgeprägte Anstieg der Fließgrenze und der Viskosität im Untersuchungszeitraum. Mit zunehmendem Eintrag an Mischenergie im Intensiv-Mischer, durch Anhebung der Werkzeuggeschwindigkeit und durch Verwendung des Stiftwirblers, verbesserten sich beide Frischbetonkennwerte bei geringeren Schwankungen über den Untersuchungszeitraum. Für den untersuchten Grobkorn-UHPC verbesserten sich die Frischbetoneigenschaften bis zu einer Werkzeuggeschwindigkeit von 9 m/s, die damit um ein Vielfaches über der eines Standard-Mischers liegt.

In [3] wurde eine UHPC mit 8 mm Größtkorn für ein Betonfertigteilverk entwickelt. Um die Konsistenzklasse F3 des Betons mit einem 1,5 m<sup>3</sup> fassenden Produktions-Tellermischer zu erreichen, mussten der Wassergehalt um 7 Prozent und die Fließmittelmenge um 20 Prozent gegenüber einem Intensiv-Mischer Typ Eirich im Technikums-Maßstab erhöht werden.

Neben dem Mischer-Typ nimmt auch die Baugröße Einfluss auf die Frischbetoneigenschaften. [53] hat eine Abnahme der Viskosität mit zunehmender Baugröße des Mixers nachgewiesen.

Nach [54] führen die Deagglomeration und die kontinuierliche Entfernung der frühen Hydratationsprodukte mit kolloidaler Größenordnung von der Partikeloberfläche in einem Suspensions-Mischer zur Erhöhung des kolloidalen Charakters der Suspension. Der Anteil an Partikeln kleiner 5 µm steigt durch Mischen mit hoher Scherbelastung deutlich an und führt zu einer deutlich geringeren Entmischungsneigung.

### 2.2.5 Einfluss des Mischregimes auf die Rheologie von Beton

In den Untersuchungen von [54] führte das Mischen von SVB in einem Intensiv-Mischer Typ Eirich über die Stabilisationszeit hinaus zu einer Verschlechterung der Frischbetoneigenschaften. Neben der fortschreitenden Deagglomeration infolge Partikel-Kollisionen untereinander und mit dem Mischwerkzeug wird dies mit dem Abrieb der groben Gesteinskörnung und dem Abrieb der frühen Hydratationsprodukte von der Zementoberfläche erklärt. Durch die zusätzliche Oberfläche steigt der Wasser- und Fließmittelsanspruch. Für Rüttelbetone ohne Fließmittel hatte bereits [55] die Vergrößerung der Oberfläche infolge langen Mischens nachgewiesen und den Zementleim als „sämiger und klebriger“ beschrieben. Die Betondruckfestigkeit stieg mit der Mischdauer an.

Die grobe Gesteinskörnung wirkt wie eine Mahlhilfe (Kugel-Mühlen-Effekt) [55]. Dabei steigt die kinetische Energie der Partikel bei einer Erhöhung der Werkzeuggeschwindigkeit im Quadrat an und bewirkt die Auflösung von Agglomeraten hoher Festigkeit. Das Zeitfenster der Mischdauer, welches zu optimalen Frischbetoneigenschaften führte, wurde deshalb mit steigendem Grobkorngehalt und steigender Werkzeuggeschwindigkeit kleiner. Für SVB wird eine hohe Werkzeuggeschwindigkeit bis zum Übergang vom Kornhaufwerk zur Suspension empfohlen, die danach deutlich abgesenkt und bis zum Erreichen der Stabilisationszeit konstant gehalten wird.

Der Einfluss der verzögerten Fließmittelzugabe wurden in [52] mit einem Intensiv-Mischer Typ Eirich untersucht. Je später ein Drittel des Fließmittels zugegeben wurde, desto höher war das gemessene Setzfließmaß eines Grobkorn-UHPC (Bild 2.35).

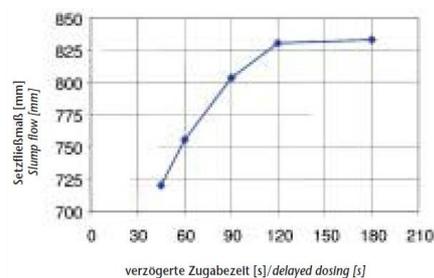


Bild 2.35: Setzfließmaß in Abhängigkeit vom Zugabezeitpunkt des Fließmittels [52]

Für die Herstellung von Hochleistungsbeton in einem Doppelwellen-Mischer empfiehlt [4] ein dreistufiges Verfahren, bei dem zunächst der Leim, dann der Mörtel und anschließend durch Zugabe der groben Gesteinskörnung der Beton hergestellt wird. Sowohl der Energieverbrauch, der Verschleiß der Mischwerkzeuge, der Fließmittelbedarf und die für eine vorgegebene Zielkonsistenz des Betons erforderliche Menge an Leim waren für dieses Mischregime minimal. Dabei erwies sich das dreistufige Mischregime als umso vorteilhafter, je geringer die Menge an Leim war.

Eine verzögerte Zugabe des Fließmittels während des Mischvorganges führte in [56] für die untersuchten Leime zu einer Verringerung der Absolutwerte aller rheologischen Parameter. Die thixotropen Eigenschaften wurden durch Integration der Fläche zwischen der ansteigenden und abfallenden Fließkurven bestimmt. Dabei führten eine Steigerung der Menge und die verzögerte Zugabe zu geringeren Werten, was auf eine verminderte gegenseitige Anziehung von Partikeln (Flockung) zurückgeführt wurde. Durch die verzögerte Zugabe des Fließmittels können die unmittelbar nach Wasserzugabe gebildeten Doppel-Hydroxide zunächst weiter reagieren, ohne Fließmittelmoleküle adsorbieren zu können. Die Adsorptionsgeschwindigkeit hängt nach [57] neben der Molekül-Architektur auch von der in das Mischgut eingetragenen Scherenergie ab. Der Autor konnte für das untersuchte PCE-Fließmittel mit geringer Adsorptionsneigung (geringe Ladungsdichte) nachweisen, dass mit der selben Anzahl an Behälterumdrehungen das Fließmittel zu einem höheren Grad auf den Zementpartikeln adsorbierte, wenn die Werkzeuggeschwindigkeit erhöht wurde.

### 2.2.6 Fließmittel

Bereits ca. 90 Prozent der gegenwärtig hergestellten Betone enthalten Betonzusatzmittel nach DIN 1045-2, die auf physikalischer oder chemischer Weise die Frisch- und Festbetoneigenschaften verbessern. Die Zusatzmittelgruppe der Verflüssiger nimmt dabei mit einem Anteil von über 75 Prozent die dominierende Rolle ein [58]. Bei Hochleistungsbetonen sind diese Zusatzmittel in hoher Dosierung integraler Bestandteil des Mischungsentwurfes und ermöglichen erst die für die Verarbeitung des Frischbetons erforderliche Konsistenz.

TAYLOR [59] unterteilt den Hydratationsvorgang in zwei Hauptphasen. In der ersten (Aluminat)phase reagieren die aluminatreichen Klinkerphasen ( $C_3A$  und  $C_4AF$ ) der Zement-Agglomerate mit Sulfat-Ionen zu Ettringit, das sich an der Oberfläche der Zementpartikel ablagert. Damit werden die Hydratationsreaktionen für 2 - 4 Stunden erheblich verlangsamt und das Zeta-Potential der Suspension bestimmt. Für die Frischbetoneigenschaften ist nur diese erste der zwei Hydratationsphasen relevant [60].

Die aluminatreichen Klinkerphasen können in der ersten Hydratationsphase neben Ettringit auch metastabile geschichtete Kalzium-Aluminium-Doppelhydroxide (Ca-Al-LDHs) ausbilden, die im Zeitraum von wenigen Minuten bis Stunden zu stabilem Kaotit ( $C_3AH_6$ ) umgesetzt werden. Von großer Bedeutung ist dabei die Art des Sulfatträgers [61]. Gips bewirkt die Ausbildung von Doppelhydroxiden, während dies bei der Verwendung von Halbhydrat als Sulfatträger unterbleibt. Das Hydroxid kann aber durch Sulfate, Carbonate, Chloride und organische Substanzen ersetzt werden. Da die Einlagerung von Sulfat thermodynamisch bevorzugt ist, bildet sich - abhängig vom molaren Verhältnis  $SO_4^{2-}/C_3A$  und der Lösungsgeschwindigkeit des Sulfatträgers - Monosulfat (Afm-Phase) aus, der die Fließfähigkeit stark herabsetzt [60].

Für das Fließmittel zeigt [62] drei Möglichkeiten für den Verbleib in einer Zement-Suspension auf (Bild 2.36). Neben der Adsorption der FM-Moleküle auf den Klinker- und Hydratoberflächen können diese in der Porenlösung verbleiben oder mit den geschichteten Doppel-Hydroxiden sogenannte organomineralische Phasen (OMP) ausbilden (Interkalation). Der in die organomineralischen Phasen eingebundene Anteil an Fließmittel ist somit für die eigentliche Dispergierung unwirksam.

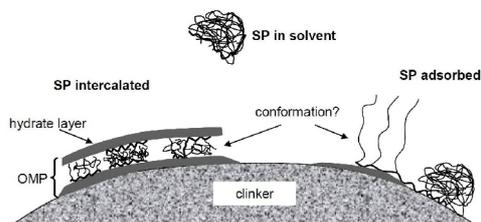


Bild 2.36: Fließmittel-Moleküle in einer Zement-Suspension; Interkalation (OMP), in Lösung oder adsorbiert [62]

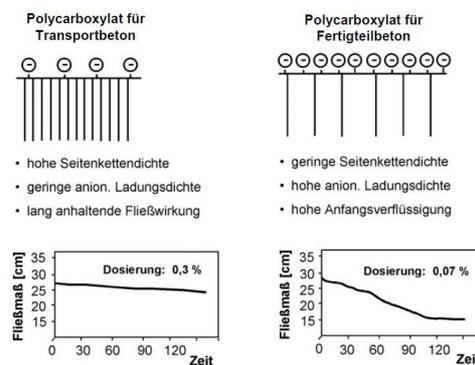
Anionen-Austauschexperimente[63] belegen, dass unter alkalischen Bedingungen kein Austausch der in organomineralischen Phasen eingebundenen FM-Moleküle gegen Hydroxid-Ionen stattfindet. Bei Zement mit sehr niedrigem Sulfatgehalt (molares Verhältnis  $SO_3^{2-}/C_3A$  zwischen 0.1 bis 0.35) entstehen somit stabile OMP.

Bei Molverhältnissen zwischen 0.7 bis 2 entstehen keine OMP, da das Angebot an Sulfat-Ionen ausreichend ist und deren Anlagerung gegenüber den FM-Molekülen bevorzugt ist. Fließmittelmoleküle, die durch eine zu geringe Lösungsgeschwindigkeit des Sulfatträgers in die Doppel-Hydroxide eingebunden wurden, werden nach der

verzögerten Freisetzung der Sulfat-Ionen durch Austauschreaktionen verfügbar und führen zur Nachverflüssigung. Um die Ausbildung von organomineralischen Phasen zu minimieren und deren Auswirkungen abzumildern, empfiehlt [63] die Verwendung von Fließmitteln mit langen Seitenketten und Zementen mit einem hohen Sulfatgehalt (Verhältnis  $\text{SO}_4^{2-}/\text{C}_3\text{A} > 0.75$ ) bei hoher Lösungsgeschwindigkeit des Sulfat-Trägers. Nach Rößler [60] können PCE-Fließmittel die Löslichkeit des Sulfatträgers stark herabsetzen, sodass neben Monosulfat auch langprismatische Ettringite entstehen und das  $\text{C}_3\text{A}$  unkontrolliert reagiert, wodurch die Fließfähigkeit herabgesetzt wird.

In der Aluminat-Phase beschleunigen PCE-Fließmittel die Hydratation von  $\text{C}_3\text{S}$ , was durch eine höhere Menge an Hydratationsprodukten nachgewiesen wurde [62]. In der eigentlichen Silikat-Phase (2. Hauptphase nach [59]) hingegen wird die Reaktion von  $\text{C}_3\text{S}$  verlangsamt und somit das Erstarren verzögert.

Die Verzögerung der Erstarrungsvorgänge wird zudem von der Molekül-Architektur der Fließmittel bestimmt. Bei den Molekülen handelt es sich um sogenannte Kammpolymere, die aus einem adsorptivem Teil (negativ geladene Carboxylgruppen) und den hydrophilen Seitenketten bestehen. Bei der Herstellung der Polymere kann neben der Anzahl und der Dichte der Seitenketten auch deren Länge beeinflusst werden, um die Adsorptionsneigung und die Dispergierleistung zu steuern.



*Bild 2.37: Anpassung der Molekül-Architektur an die Anwendung [64]*

Die Adsorptionsneigung steigt mit abnehmender Seitenkettendichte, da im Gegenzug die Dichte der Carboxylgruppen ansteigt. Die zunehmende Interaktion zwischen Zement und PCE bedingt die unerwünschte Verzögerung von Erstarrungsbeginn und Erstarrungsende [47]. Durch die Adsorption der PCE-Moleküle auf der Zementoberfläche wird das Zetapotential einer Zement-Suspension von  $-3$  mV bis  $-7$  mV in Richtung des isoelektrischen Punktes verschoben. Die damit verbundene Koagulierung wird durch die sterischen Eigenschaften der Seitenketten unterbunden. Ausgehend von der fixen Ladungsdichte eines Polymers sind lange Seitenketten für die Dispergierleistung förderlich. Da die Molmasse mit der Länge der Seitenketten steigt, sinkt dadurch die Anzahl der Moleküle in der vorgegebenen massebezogenen Dosiermenge.

RÖBLER [60] führt die Erhöhung der Partikel-Packungsdichte vor allem auf die Verdrängung von Luft durch die im Fließmittel enthaltenen Entschäumer zurück. Das in der Porenlösung enthaltene Fließmittel beeinflusst die Keimbildung und das Wachstum der Hydratationsprodukte und deren Struktur [47]. Dabei bilden sich bevorzugt

dichte innere (Ip-) C-S-H Phasen aus, welche einen höheren E-Modul aufweisen als die spitznadeligen (Op-) C-S-H Phasen und die Festigkeitssteigerung erklären.

Die von [51] durchgeführten Messungen mit einem Rheometer belegen den geringen Temperatureinfluss auf die Rheologie von Zement-Suspensionen für das untersuchte PCE-Fließmittel oberhalb einer Mindestdosierung. Während der in [65] beschriebene hohe Einfluss der Temperatur auf die Rheologie bei Fließmitteln der neuesten Generation somit nicht mehr gegeben ist, weist der Hersteller BASF [66] auf die Scherempfindlichkeit seiner Hochleistungsverflüssiger auf PCE-Basis hin. Beim Fördern der Fließmittel mit Fliehkraftpumpen, die konstruktionsbedingt eine hohe Scherwirkung aufbauen, können PCE-Fließmittel ihre Molekülstruktur verändern, was negative Auswirkungen auf deren Leistungsfähigkeit haben kann. Da bei Einsatz von Intensiv-Mischern, Suspensions-Mischern und Betonpumpen auch sehr hohe Scherbelastungen auftreten, ist der damit ggf. verbundene Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Fließmittel zu berücksichtigen.

Fließmittel beeinflussen die Grenzfläche zwischen Partikel und Porenlösung und somit auch die physikalischen Eigenschaften wie Fließgrenze und Viskosität [62]. In [1] wurde der aktuelle wissenschaftliche Kenntnisstand über die Auswirkungen von Zusatzmitteln auf die Hydratation von Portlandzement zusammengetragen. Die Autoren machen darauf aufmerksam, dass bis dato kein Hydratationsmodell für Portlandzement in Gegenwart von Zusatzmitteln existiert. Als ein wesentliches Manko wird die Bandbreite der experimentellen Randbedingungen ausgemacht. Dies umfasst die Ausgangsmaterialien hinsichtlich der Zusammensetzung und Partikelgrößen-Verteilung, deren Mischungsverhältnis und das Mischregime. Beispielsweise wird die Kristallform von  $C_3A$  und deren Einfluss auf die Adsorption von Zusatzmittel selten berücksichtigt. Ähnlich verhält es sich mit der Art des Sulfatträgers und dem  $So_4^{2-}/C_3A$  - Verhältnis. Die Dosierung der Fließmittel wird in Versuchen häufig sehr hoch gewählt, um eine merkliche Reaktion herbeizuführen. Die massebezogene Dosierung von Zusatzmitteln verwischt den Einfluss der Molekül-Architektur, da bei unterschiedlichen Molmassen die Anzahl der Moleküle nicht gleich ist. Eine konstante molare Dosierung verbessert folglich die Aussagekraft der Versuche.

### ***2.3 Erfassung rheologischer Parameter im Mischer***

#### **2.3.1 Drehmoment-Sensor**

DATUM ELECTRONICS [67] beschreibt ein System zur Drehmoment-Erfassung an einer Mischwelle eines Doppelwellen-Mischers mit einem Drehmoment-Sensor. Die konventionelle Bewertung der Frischbeton-Konsistenz über die Leistungsaufnahme des Antriebs schied aufgrund von starken Spannungs-Schwankungen in der Energieversorgung am Airport Heathrow aus. Um konstruktive Umgestaltungen am Mischerantrieb zu vermeiden, wurden Lösungen mit einem zwischengeschalteten Drehmoment-Sensor bereits in der Vorplanung verworfen.



Bild 2.38: Einbauort des Drehmoment-Sensors [67]

Um das Drehmoment ohne Veränderungen an den mechanischen Komponenten zu messen, wurden Drehmoment-Sensoren auf Basis von Dehnmessstreifen (DMS) installiert. Als idealer Einbauort um das Messsystem vor Verschmutzung und Beschädigung zu schützen, wurde die in Bild 2.38 dargestellte Kammer bestimmt, in der die Mischwellen mit den Getriebeausgangswellen verschraubt sind. Das Messprinzip basiert auf den Erkenntnissen von Robert Hooke und Lord Kelvin. Während Hooke die Proportionalität zwischen der Materialdehnung und der zugehörigen Materialspannung postulierte, entdeckte Kelvin den Zusammenhang zwischen der mechanischen Dehnung eines Widerstandsdrahtes und der resultierenden Widerstandsänderung. Die Proportionalität der Widerstandsänderung  $\Delta R$  zur Dehnung  $\varepsilon$  des Widerstandsdrahtes wird als K-Faktor bezeichnet.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad \text{mit Elastizitätsmodul } E \quad (\text{Gl. 2.26})$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \sim \frac{\Delta R}{R} \quad (\text{Gl. 2.27})$$

Der typische Folien-Dehnmessstreifen wird aus einer mit Widerstandsmaterial kaschierten Folie geätzt und mit elektrischen Anschlüssen versehen. Die durch Dehnung oder Stauchung verursachten Widerstandsänderungen sind so gering, dass diese durch die Einbindung in eine Wheatstone-Brückenschaltung (Bild 2.39) erfasst und weiter verarbeitet werden. Dabei wird zwischen Vollbrücken mit 4 DMS, Halbbrücken mit 2 DMS und Viertelbrücken mit einer DMS unterschieden.

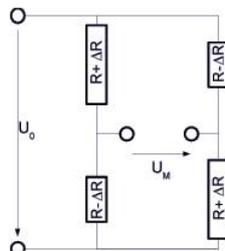


Bild 2.39: Wheatstone-Brücke [68]

Bei der Wheatstone-Brücke liegen zwei Spannungsteiler parallel, die aus jeweils zwei Widerständen bestehen. Die zwischen den Spannungsteilern gemessene Brückenspannung ist proportional zur Widerstandsänderung des (der) DMS infolge Dehnung [68].

$$\frac{U_M}{U_0} \sim \frac{\Delta R}{R} \quad (\text{Gl. 2.28})$$

Aus dem Anlegen einer Wechselspannung resultiert eine zum Drehmoment proportionale amplitudenmodulierte Wechselspannung am Ausgang. Um einen stabilen und wartungsfreien Betrieb an rotierenden Bauteilen zu ermöglichen, werden sowohl die Speisespannung der DMS-Brücke als auch das Messsignal durch Transformator-Drehüberträger übermittelt. Die Rohdaten werden digitalisiert und über eine RS 485-Verbindung in den Kon-

trollraum übermittelt und mit einer Software ausgewertet. Durch die starken Schwankungen der Rohdaten ist noch eine Glättung erforderlich, um einen Mittelwert ausgeben zu können. Auf Basis der bekannten Korrelationen zwischen Wassergehalt, Konsistenz und Motordrehmoment kann somit - unabhängig von den Schwankungen in der Energieversorgung - das Mischregime bewertet und eingegriffen werden [67].

### 2.3.2 Drehmoment-Erfassung mit Frequenzumrichter

Die bei Normalbeton bewährte Überwachung des Mischvorgangs durch die Strom- oder Leistungsaufnahme der Motoren bei Nenndrehzahl (Bild 2.3) ist nach [69] für die rheologische Bewertung von SVB ungeeignet.

CONSOLIS [69] setzt das System für Planeten-Mischer ein, bei denen in der letzten Mischphase die Drehzahl in 5 Stufen von 100 Prozent auf 20 Prozent der Ausgangsdrehzahl abgesenkt wird. Dabei wird mit einem Frequenzumrichter das Drehmoment bestimmt, welches zur Aufrechterhaltung der vorgegebenen Werkzeugdrehzahl erforderlich ist. Der Betrieb in den einzelnen Stufen erfolgt für die höheren Drehzahlen für 5 Sekunden und verlängert sich bei niedrigen Drehzahlen auf bis zu 10 Sekunden, um Anlaufeffekte oder zeitliche Übergangseffekte zu überwinden und die Gleichgewichts-Viskosität zu ermitteln [5]. Dieser Zusammenhang lässt sich am Zwei-Platten-Modell aufzeigen (Bild 2.40). Wenn die obere Platte mit einer konstanten aber sehr geringen Geschwindigkeit in Bewegung gesetzt wird, werden in einer Anlaufphase nicht alle Schichten gleichmäßig gegen benachbarte Schichten verschoben. Damit ist die Scherrate im Scherspalt in dieser Phase nicht konstant. Erst nachdem im ganzen Scherspalt eine konstante Scherrate vorliegt, wird die Scherkraft gemessen, die den Fließwiderstand der gesamten Probe als Gleichgewichts-Viskosität wiedergibt.

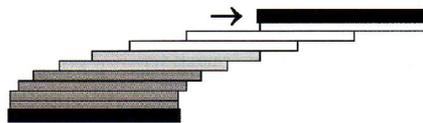


Bild 2.40: Anlaufeffekt bis Gleichgewichts-Viskosität erreicht ist [5]

Die Mischwerkzeuge erfüllen allerdings nicht die Anforderungen für die quantitative Scherspannungsermittlung. Es können keine genauen Flächen bestimmt werden, in denen die Kraftübertragung und somit die Scherung erfolgt. Die Wertepaare Drehzahl/Drehmoment in den einzelnen Stufen werden deshalb mittels linearer Regression zur Berechnung der rheologischen Parameter  $g$  und  $h$  genutzt und daraus das Setzfließmaß abgeleitet.

$$T = g + h \cdot N \quad (\text{Gl. 2.29})$$

$T$  [Nm] ist das gemessene Motordrehmoment,  $N$  [ $\text{s}^{-1}$ ] die Werkzeuggeschwindigkeit. Die Parameter  $g$  und  $h$  beschreiben das Fließverhalten in relativen Einheiten und sind das Pendant zu den rheologischen Parametern Fließgrenze  $\tau_F$  und plastische Viskosität  $\eta$ .

Bei einer Abweichung der rheologischen Parameter von der Vorgabe wird der Mischer wieder auf 100 Prozent der Ausgangsdrehzahl beschleunigt und eine von der Füllmenge und der Rezeptur abhängige Wassermenge automatisch nachdosiert. Die Veränderungen gegenüber einer Standard-Mischanlage sind überschaubar. Erforderlich

ist ein Frequenzumrichter, der die Werte für das aktuelle Motor-Drehmoment mit guter Genauigkeit bestimmt und eine geeignete Verkabelung zwischen Frequenzumrichter und Motor zur Einhaltung der elektromagnetischen Verträglichkeit. Ein Computer mit Messwertkarte steuert das System, führt die Berechnungen durch und ist in der Regel an die Steuerung der Mischanlage angekoppelt. Die Messwertkarte bietet zudem die Möglichkeit weitere Signale zu erfassen und in die Berechnungen einzubeziehen. Zu nennen ist beispielsweise die Temperaturerfassung des Getriebeöls, welches die Leerlaufverluste beeinflusst. Das Nachstellen der Mischwerkzeuge und die daraus resultierenden veränderten Messwerte werden unter Berücksichtigung der bisher gemessenen Chargen durch die Software kompensiert. Die von NORDENSWAN et al. [69] angeführten Vergleichsmessungen zwischen den berechneten Werten der Software und dem gemessenen Setzfließmaß für einen Beton der Konsistenzklasse F6 belegen eine gute Übereinstimmung. Bei einer Gegenüberstellung von 45 Einzelchargen differieren die Werte für das Setzfließmaß um maximal 7 cm. Dabei ist zudem die Frage zu klären, ob diese Abweichungen auf das Consolis-System zurückzuführen sind, oder aber auf die Probennahme und Durchführung der Versuche zur Bestimmung der Setzfließmaße.

### 2.3.3 Viscoprobe

Der von Skako Concrete vertriebene Viscoprobe<sup>TM</sup> misst den Bewegungswiderstand einer in Beton eingetauchten Stahlkugel (Durchmesser 10 cm), die über einen Stab an einem Drehmoment-Sensor befestigt ist (Bild 2.41).



Bild 2.41: Viscoprobe in einem Couvrot Planeten-Mischer mit 1.5 m<sup>3</sup> Mischvolumen [70]

Da die Scherfläche nicht definiert ist, sind zwei Wertepaare aus Geschwindigkeit und zugehörigem Drehmoment für die Berechnung der Parameter  $g$  und  $h$  erforderlich. In einem Ringtrog-Mischer werden dazu zwei Viscoprobe<sup>TM</sup> eingesetzt, die auf verschiedenen Radien des Mischarms befestigt werden, um bei zwei unterschiedlichen Geschwindigkeiten Messwerte zu erhalten. In einem Planetenmischer ist nur ein Exemplar erforderlich, da der Rotation des Mischsterns um seine eigene Achse eine Planetenbewegung des Mischsterns im Mischbehälter überlagert ist. Durch diese epizykloide Bewegung ist die Geschwindigkeit des am Mischstern befestigten Drehmoment-Sensors veränderlich. Für die Auswertung werden die Drehmoment-Werte bei der niedrigsten und der höchsten Geschwindigkeit genutzt.

Das System liefert über den gesamten Mischablauf Werte in Echtzeit und stellt über die Software die gegenwärtigen rheologischen Parameter dar. Da ein Referenzverlauf mit den zugehörigen Toleranzen hinterlegt ist, sind evtl. Abweichungen erkennbar und durch geeignete Gegenmaßnahmen korrigierbar.

Als großer Vorteil des Systems wird in [70] herausgestellt, dass nicht auf das Motor-Drehmoment zurückgegriffen wird. Als Störgrößen für die Präzision werden Reibungsverluste zwischen Mischwerkzeug und Wandung (verklemmte Gesteinskörnung) sowie Einflüsse durch Motor und Getriebe genannt, die die Eignung eines klassischen „Wattmeters“ bei SVB in Frage stellen. Da der mit dem Sensor erfasste Kraftaufwand hauptsächlich durch den Widerstand gegen die Vorwärtsbewegung - also die Betonkonsistenz - bestimmt wird, wird das System auch als „Super-Wattmeter“ beworben.

Viscoprobe™ liefert die Durchschnittswerte einer ganzen Charge und erfordert - durch die Datenerfassung für zwei unterschiedliche Scherraten **während** des Mischvorgangs - nicht zwangsläufig eine Verlängerung der Mischdauer.

## 3 Anforderungsprofil an den Labor-Mischer

### 3.1 Mischtechnik

Für die schnelle, energieeffiziente und verschleißarme Herstellung von Hochleistungsbeton ergeben sich durch die Mischtechnik nachfolgende Anforderungen an den Labor-Mischer:

- Hochleistungsbetone weisen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung eine große Bandbreite auf. Dies bezieht sich u. a. auf das Größtkorn, den w/b-Wert, den Gehalt an Mikrofüllern und die verwendete Menge an Fließmittel. Die Art und der Anteil der Ausgangsstoffe bestimmen maßgeblich die Erfordernisse im Hinblick auf konvektive und dispersive Transportvorgänge und nehmen somit Einfluss auf die Dauer des Mischvorgangs. Um auf die variierenden Anforderungen aus den Mischungszusammensetzungen reagieren zu können, müssen die Anteile des konvektiven und dispersiven Mischgut-Transportes durch das eingesetzte Misch-Prinzip ebenso variabel veränderbar sein. Die von DEHN et al. [52] empfohlenen Werkzeuggeschwindigkeiten von bis zu 9 m/s liegen um ein Mehrfaches über der maximalen Werkzeuggeschwindigkeit von Standard-Mischern (z.B. dem Elba EMS 60 mit ca. 2,4 m/s).
- Drehzahlregelung mit hohem Gesamtwirkungsgrad des Mischer-Antriebes, der sich aus einem Frequenzumrichter zur Drehzahlregelung, einem Asynchron-Drehstrommotor, einer Untersetzung und dem Mischwerkzeug inkl. Lagerung zusammensetzt. Der Gesamtwirkungsgrad ergibt sich dabei aus dem Produkt der Wirkungsgrade der einzelnen Komponenten.
- Neben der höheren Drehzahl für eine bessere Deagglomeration muss das Motor-Drehmoment erhöht werden, um die gewählte Drehzahl in allen Mischphasen aufrecht erhalten zu können. Hochleistungsbeton weist vor dem Übergang zur Suspension eine deutlich höhere Kohäsion auf als Normalbeton. Da sowohl die Drehzahl als auch das Drehmoment erhöht werden müssen, ist eine Änderung des Untersetzungs-Verhältnisses zwischen Motor und Mischwerkzeug nicht zielführend. Die Motorleistung muss erhöht und ggf. die Untersetzung angepasst werden.
- Möglichkeit zur effizienten Herstellung von Teilmengen; insbesondere für Mischregime mit mehrstufiger Materialzugabe

### 3.2 Dosiereinrichtung

Die Vorteile eines dreistufigen Mischregimes bei konstanter Drehzahl für einen Doppelwellen-Mischer, bei dem zunächst der Leim, dann der Mörtel und abschließend der Beton durch die Zugabe der groben Gesteinskörnung hergestellt wird, sind in [4] benannt.

Um mehrstufige Mischregime mit dem Labor-Mischer reproduzierbar durchführen zu können, ist es erforderlich, dass die einzelnen Ausgangsstoffe in einer zuvor festgelegter Reihenfolge und zu einem festgelegten Zeitpunkt automatisiert in den Mischbehälter eingebracht werden. Dabei ist in der technischen Umsetzung weiter zu unterscheiden zwischen der kontinuierlichen Zugabe über einen längeren Zeitraum und der möglichst schnellen, vollständigen Zugabe einzelner Ausgangsstoffe.

### 3.3 *Rheologische Bewertung im Mischer*

Die Bestimmung rheologischer Parameter im Mischer erweitert den Anforderungskatalog aus Kapitel 3.1:

- Ausreichend großer Scherspalt zwischen Mischwerkzeug und Mischer-Wandung: Andernfalls besteht die Gefahr, dass die Gesteinskörnung die Bewegung des Mischwerkzeugs infolge erhöhter Reibung behindert. Das zur Überwindung der Reibung erforderliche erhöhte Drehmoment führt zu starken Schwankungen im Drehmoment-Verlauf und verfälscht die Messungen der Rohdaten. Köhler [71] empfiehlt den vierfachen Größtkorn-Durchmesser als Mindestscherspalt für Rheometer. Unter Verwendung von 16 mm Größtkorn müsste der Abstand des Mischwerkzeuges von der Mischer-Wandung bzw. Einbauten folglich mindestens 64 mm betragen.
- Kontrollierte Beschleunigung des Mischwerkzeugs aus dem Stillstand und Betrieb des Mischwerkzeugs bei niedrigsten Drehzahlen: Zur Bestimmung der statischen Fließgrenze ist eine kontrollierte Beschleunigung des Mischwerkzeugs aus dem Stillstand erforderlich. Die rheologischen Parameter  $h$  und  $g$  können nur bestimmt werden, wenn der Motor bei sehr niedriger Werkzeuggeschwindigkeit ohne nennenswerte Drehzahlschwankungen betrieben werden kann. In Anlehnung an die Rheometrie ist allerdings der drehmomentgeführte Betrieb vorzuziehen.
- Höchste Genauigkeit bei der Erfassung der tatsächlichen Drehzahl und des zugehörigen Drehmoments: Das Drehmoment kann mit sehr hoher Genauigkeit durch Drehmoment-Sensoren erfasst werden. Alternativ kann das vom Frequenzumrichter berechnete Drehmoment genutzt werden. Die Güte dieser Berechnung ist allerdings vom Regelverfahren des Umrichters abhängig. Die Drehzahl kann ebenfalls als berechneter Wert dem Frequenzumrichter entnommen werden oder aber über einen Drehgeber (zusätzliches Bauteil), mit der von der Auflösung des Drehgebers vorgegebenen Genauigkeit, gemessen werden. Durch die Rückführung des Drehgebersignals in den Frequenzumrichter wird dessen Regelgenauigkeit zudem deutlich gesteigert.
- Möglichst keine veränderlichen Verluste wie z.B. Getriebeverluste in Abhängigkeit von der Temperatur des Getriebeöls
- Hohe Steifigkeit des Antriebsstranges, um hochdynamische Messvorgänge wie Oszillationsversuche durchführen zu können.
- Möglichst keine zusätzlichen, wartungsintensiven Komponenten

## 4 Umsetzung im Labor-Mischer KKM-R 30

### 4.1 Baugruppen eines Mixers

Ein konventioneller Mischer, mit der Möglichkeit rheologische Parameter zu bestimmen, kann in 5 Baugruppen untergliedert werden (Bild 4.1).

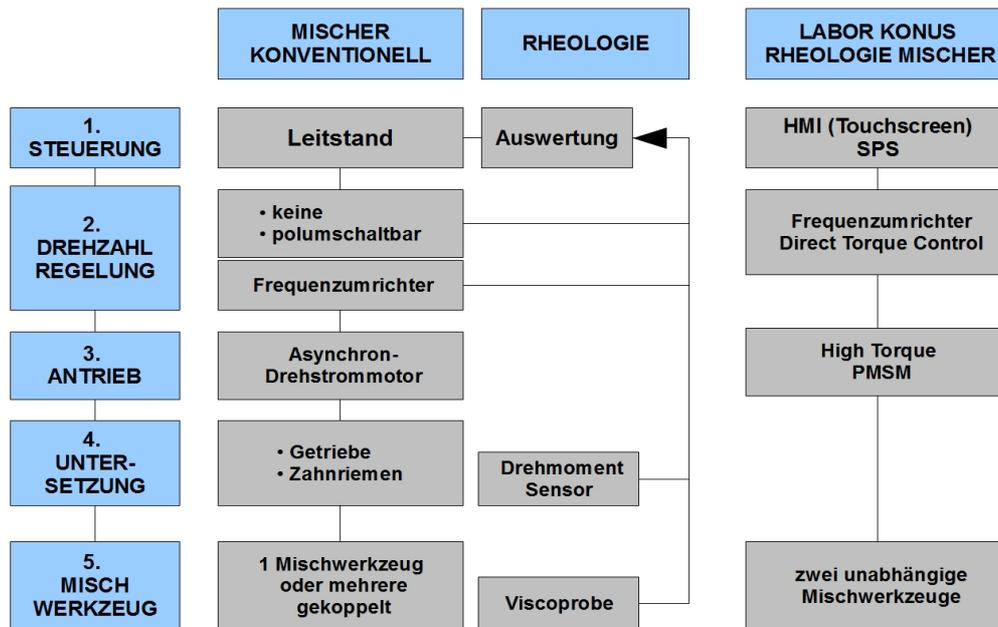


Bild 4.1: Unterteilung des Mixers in 5 Baugruppen

Die Steuerung der Mischanlage (Baugruppe 1) erfolgt über einen Leitstand. Die Soft- und Hardware für die Berechnung der Fließeigenschaften des Betons ist dabei entweder integraler Bestandteil oder aber ein externes Modul liefert die Berechnungen an den Leitstand. Wird ein polumschaltbarer Motor verbaut, kann die Drehzahl des Mischwerkzeugs in zwei Stufen verändert werden. Ein Frequenzumrichter ermöglicht den drehzahlvariablen Betrieb oberhalb einer Mindestdrehzahl. Ist keine Drehzahlregelung erforderlich, erfolgt der Start mit einem sogenannten Sanftanlauf und der Betrieb bei Netzfrequenz (Baugruppe 2).

Als Antrieb (Baugruppe 3) werden herstellerunabhängig Kurzschlussläufer-Asynchronmotoren verbaut, da diese sehr kostengünstig in der Herstellung sind und nahezu keine Wartung benötigen. Das Motordrehmoment eines Standard-Asynchron-Drehstrommotors (4-polig) mit einer Nenndrehzahl von ca. 1400 UPM reicht jedoch nicht aus, um das Mischwerkzeug direkt anzutreiben. Bauartbedingt nehmen die Baugröße und die Herstellungskosten eines Asynchronmotors mit mehr als 4 Polen, mit größerem Drehmoment bei niedrigerer Drehzahl, stark zu. Deshalb werden Standardmotoren mit einem Getriebe oder mit einem Zahnriemen entsprechend der Auslegung untersetzt (Baugruppe 4). Dabei sinkt infolge des Spiels im Getriebe oder der Elastizität des Zahnriemens die Steifigkeit des Antriebsstranges.

Bei den Mischwerkzeugen (Baugruppe 5) ist zwischen zwei grundsätzlich unterschiedlichen Vorgehensweisen zu unterscheiden. Entweder wird das Mischgut nahezu vollständig durch ein Mischwerkzeug oder mehrere gekoppelte Mischwerkzeuge (z.B. Einwellen- und Doppelwellen-Mischer) bewegt, oder aber distributive und disperse Transportvorgänge werden möglichst getrennt voneinander herbeigeführt.

Ausgehend vom Anforderungskatalog für den Labormischer wird nachfolgend, anhand der fünf Baugruppen, die Wahl des Aufbaus erläutert:

### **4.2 Steuerung der Mischanlage (Baugruppe 1)**

Die Steuerung der Mischanlage, die Berechnung der rheologischen Parameter sowie die Datenspeicherung von Rohdaten erfolgt mit einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS). Als Mensch-Maschine-Schnittstelle (**Human Machine Interface**) wird ein Touchscreen genutzt. Durch den Einsatz von Technik aus dem industriellen Umfeld ist eine direkte Anwendung/Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse in die Praxis sichergestellt. Da eine zeitgemäße Mischanlage ohnehin mit diesen Komponenten ausgerüstet ist, ergibt sich folglich kein Mehraufwand für die Bestimmung der Frischbetoneigenschaften im Mischer.

Die Hardware einer SPS besteht aus den von Computern bekannten Einzelkomponenten: Stromversorgung, Zentraleinheit mit CPU, dem EPROM-Speicher mit dem Betriebssystem und herstellerspezifischer Firmware, dem RAM-Speicher für das Anwenderprogramm und die Prozessdaten und ggf. einem EEPROM, der Anwenderprogramme auch ohne Spannungsversorgung speichert. Darüber hinaus kann eine SPS mit nachfolgenden Baugruppen modular aufgebaut werden:

- Prozessanschlüsse von den Sensoren und zu den Aktoren, als boolesche Spannungs- und Stromsignale, analoge Spannungs- und Stromsignale oder Relaiskontakte
- Feldbus-Module, die mit einem eigenen Prozessor versehen sind und den Datenaustausch zwischen SPS und einem angebundenen Feldgerät ermöglichen. Zu nennen sind u.a. Profibus (PROcess Field BUS), Modbus (TCP/IP), CAN, (Ether-)CAT, Ethernet
- Funktionsbaugruppen entlasten die CPU der SPS, indem hochdynamische Regler und Zähler mit eigenem Prozessor verbaut werden.
- Kommunikations-Module zum Anschluss von Peripheriegeräten wie Bediengeräte, externer Speicher oder zur Programmierung der SPS mit einem Computer. Häufig zu finden sind Ethernet, USB und Speicherkartenslots.

Eine mögliche Automatisierungsstruktur ist in Bild 4.2 dargestellt [72]. Sensoren erfassen Messwerte aus einem laufendem Prozess und leiten diese an die Eingänge einer speicherprogrammierbaren Steuerung weiter. Die zur Beeinflussung des Prozesses erforderlichen Stell- und Steuergrößen werden über die Ausgänge der SPS an die Aktoren weitergegeben. Sollen Prozesse beobachtet oder durch den Bediener beeinflusst werden, können Anzeige und Bediengeräte angeschlossen werden.

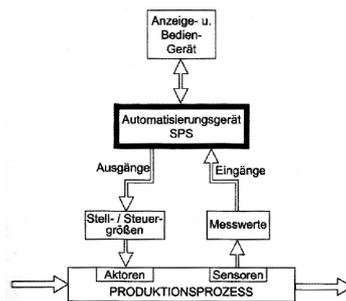


Bild 4.2: Automatisierungsstruktur mit SPS [72]

Die ersten speicherprogrammierbaren Steuerungen ersetzen durch Verdrahtung von Relaiskontakten realisierte Schaltungen. Die Programmierung erfolgte deshalb mit dem für Techniker bekannten Kontaktplan. Im weiteren Verlauf wurden herstellerspezifische Programmiersprachen wie die Anweisungsliste und der Funktionsplan entwickelt. Um der drohenden Inkompatibilität entgegenzuwirken, wurde die Norm IEC 61131 (DIN EN 61131) verabschiedet, die neben der eigentlichen SPS auch deren Peripherie einschließlich Programmier- und Testwerkzeuge und die Mensch-Maschine-Schnittstelle regelt. Aufbauend auf diesem Hersteller-übergreifenden Regelwerk wird in dieser Arbeit das Programmiersystem CoDeSys (Controller Development Systems) [73] für die industrielle Automatisierungstechnik eingesetzt. Das System lässt sich in 3 Ebenen unterteilen.

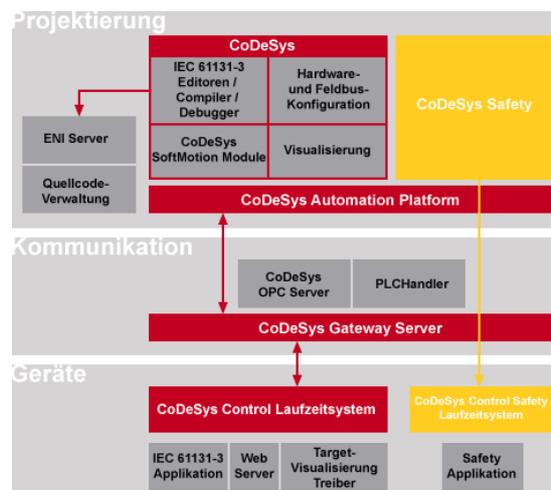


Bild 4.3: Aufbau des Programmiersystems CoDeSys [73]

### Projektierungsebene :

Das eigentliche SPS-Programmiersystem CoDeSys verfügt über einen Online-Modus, in dem das Anwenderprogramm auf der SPS ausgeführt wird. Zahlreiche Funktionen zur Überwachung und Analyse werden auf dem angeschlossenen PC bereitgestellt. Der Offline-Modus gestattet die Simulation des Anwenderprogramms auf dem PC ohne angeschlossene SPS. Wird zudem z.B. eine Mensch-Maschine-Schnittstelle (z.B. ein Touchpanel) in CoDeSys simuliert (Visualisierung), kann der Automatisierungsvorgang weitestgehend am PC entwickelt werden.

Neben den Standard-Funktionen und Standard-Funktionbausteinen zur Erstellung der Anwenderprogramme liefern die Hersteller der SPS und weitere Drittanbieter Spezialbibliotheken, die die Einbindung der Hardware ermöglichen. Der Anwender kann zusätzlich eigene Funktionen und Funktionsbausteine erstellen.

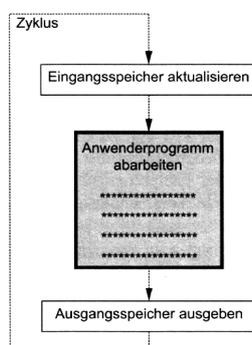


Bild 4.4: Zyklische Bearbeitung eines Anwenderprogramms [72]

Die Abarbeitung des Anwenderprogramms erfolgt zyklisch. Damit die Ein- und Ausgangssignale in einem Rechenzyklus immer die gleichen Werte behalten, also konsistent sind, erfolgt kein direkter Zugriff auf die Signale. Stattdessen werden zu Beginn eines Zyklus die Eingangssignale in einen Eingangsspeicher gelesen. Die Rechenresultate werden im Ausgangsspeicher abgelegt, der erst unmittelbar vor dem erneuten Start eines Rechenzyklus ausgegeben wird.

### **Kommunikationsebene:**

Die Kommunikation zwischen der Projektierungsebene von CoDeSys und der SPS erfolgt mit dem CoDeSys Gateway Server, auf dem ein OPC-Server aufgesetzt ist. Der Download des Maschinencodes auf die SPS und der Betrieb von CoDeSys im Online-Modus erfolgte im Rahmen dieser Arbeit über Ethernet TCP/IP.

### **Geräteebene:**

Um eine SPS mit dem Entwicklungswerkzeug CoDeSys betreiben zu können, muss das Betriebssystem CoDeSys Control installiert sein.

Zur komfortablen Steuerung der Mischanlage und des Anwendungsprogrammes wurde ein Touch-Panel verbaut. Die Programmierung des Touch-Panels erfolgte mit der Software ABB CP 400 Soft. Die Maschinendaten werden auf einer SD-Karte gesichert, für die die SPS einen Steckplatz vorsieht. Alternativ können die Daten, über den in CoDeSys integrierten OPC-Server, anderen Anwendungen mit der voreingestellten Aktualisierungsrate zur Verfügung gestellt werden.

Der in dieser Arbeit gewählte Aufbau ist in Bild 4.5 dargestellt. Die vier Frequenzumrichter für die beiden Mischer-Antriebe und die zwei Dosierpumpen wurden über Profibus DP an die SPS angebunden. Die Steuerung der Dosiereinrichtung und die Temperaturerfassung im Mischer wurden über die analogen und digitalen Ein-/Ausgänge realisiert. Die Kommunikation zwischen SPS, Bediengerät (Touchpanel) und dem Programmiersystem (CoDeSys) erfolgt über Ethernet TCP/IP.

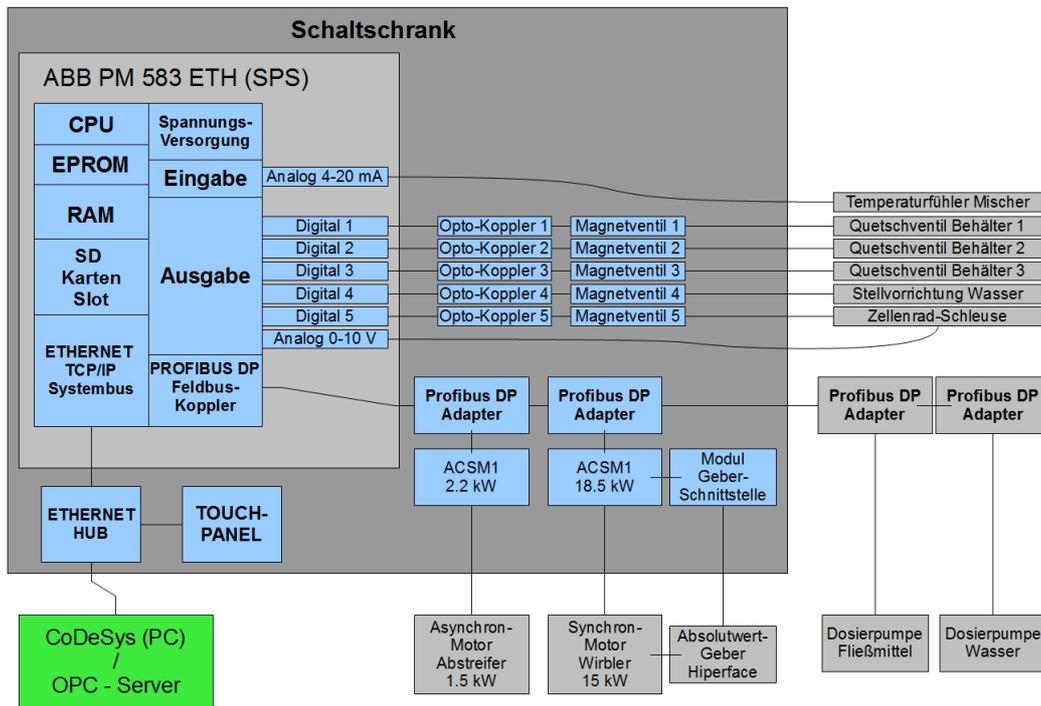


Bild 4.5: Aufbau der Steuerung für den Mischer KKM-R 30 und die Dosiereinrichtung

Bild 4.6 zeigt die bauliche Umsetzung des in Bild 4.5 aufgezeigten Aufbaus in einem Schaltschrank.

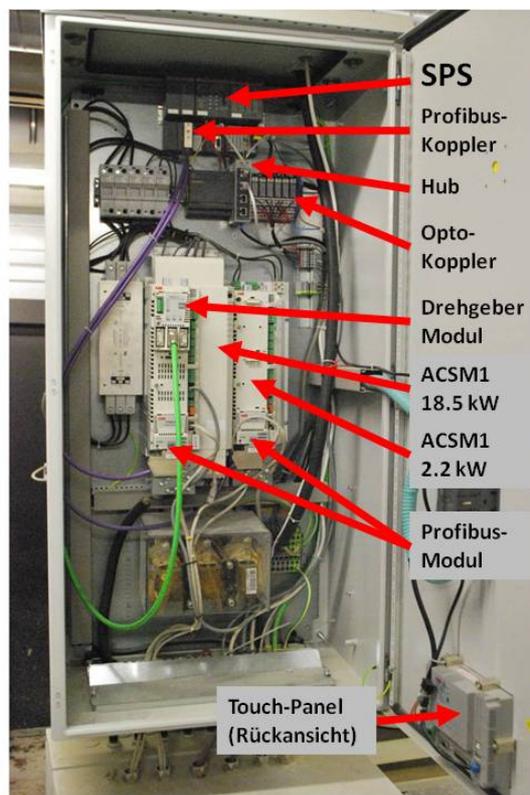


Bild 4.6: Schaltschrank für den KKM-R 30 und die Dosiereinrichtung

**Software-Entwicklung für den KKM-R 30:**

Über das Touch-Panel kann das Mischregime in 7 frei konfigurierbare Abschnitte unterteilt werden (Bild 4.7). Neben der Drehzahl und der Drehrichtung kann den beiden Antrieben auch ein maximales Drehmoment vorgegeben werden. Damit ist die tatsächliche Drehzahl abhängig von der Viskosität des Mischgutes und durch die vorgegebene Drehzahl als Maximalwert begrenzt.

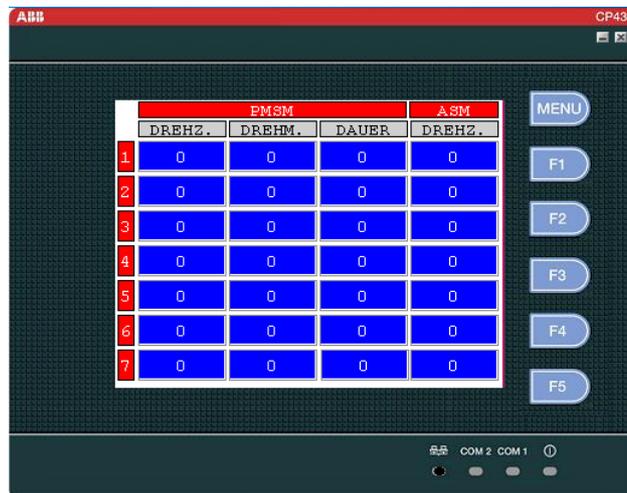


Bild 4.7: Vorgabe von Maximaldrehzahl und Maximaldrehmoment des inneren Mischwerkzeugs (PMSM) und des Abstreifers (ASM) für maximal 7 Mischstufen

Bild 4.8 zeigt, beispielhaft für die Umsetzung mit CoDeSys, den Ablaufplan für die Abarbeitung des Mischregimes durch das Anwenderprogramm der SPS.

In Bild 4.9 ist - der im Ablaufplan Bild 4.8 mit "SPEICHERN der Daten aus den ARRAYS auf SD-Karte" bezeichnete Vorgang.- als Programm in der Programmiersprache CFC (Continuous Function Chart), dargestellt. Dabei wird die aktuelle Stufe [0-7] gespeichert, die während des tatsächlichen Mischvorgangs im Takt von 250 ms festgehalten wird. Da die Mischregime auch durch die eingebrachte Mischenergie gesteuert werden können, ist die Dauer der einzelnen Stufen nicht zwangsläufig festgelegt.

Der boolesche Ausgang **.OUT** des Funktionsblocks **SD-Stufe** vom Typ **BLINK** im Ablaufplan Bild 4.9 wechselt im 5 ms-Takt den Zustand (TRUE/FALSE). Nachdem der Zustand von FALSE auf TRUE wechselt, wird der Funktionsblock **SD\_Karte\_Stufe** vom Typ **SD\_WRITE** einmalig ausgeführt. Die Speicherung erfolgt in einer Datei mit der im **ARRAY Rheologie\_Speicherplätze\_SD[5]** hinterlegten Nummer [0-100] auf der SD-Karte. Die zu speichernden Daten werden dem **ARRAY Speichern\_Stufe[]**, beginnend mit dem ersten Eintrag, entnommen. Durch die erneute Ausführung des Funktionsblocks **SD\_Karte\_Stufe** wird der nächste Eintrag aus dem **ARRAY** gespeichert. Die Variable **Schritte\_aktuell** gibt die Anzahl der tatsächlich vorhandenen Datensätze und somit die Anzahl der Durchläufe vor. Der boolesche Ausgang **.DONE** des Funktionsblocks **SD\_Karte\_Stufe** wechselt auf TRUE und beendet den Vorgang.

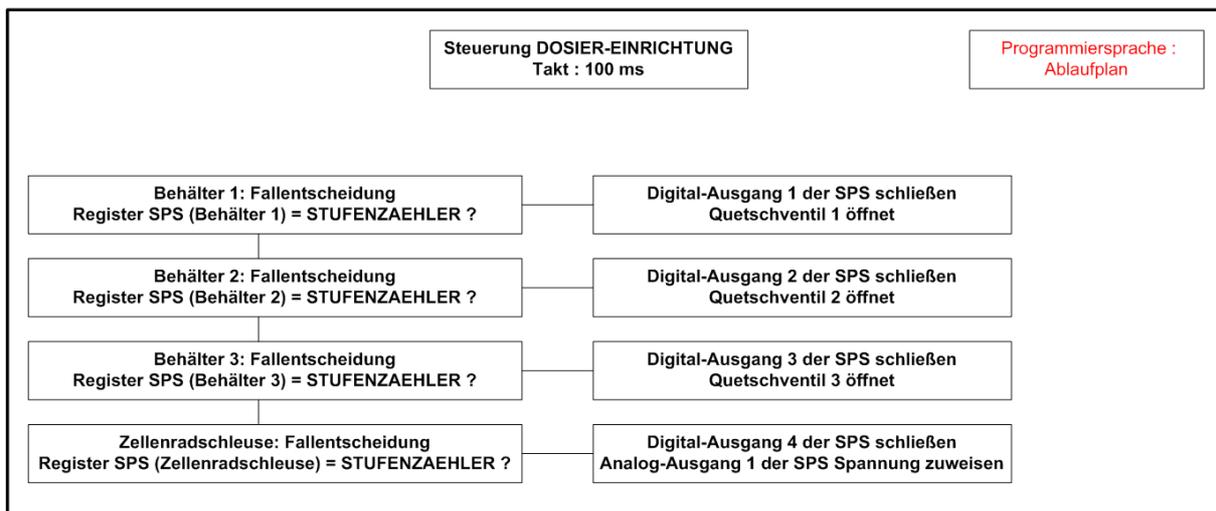
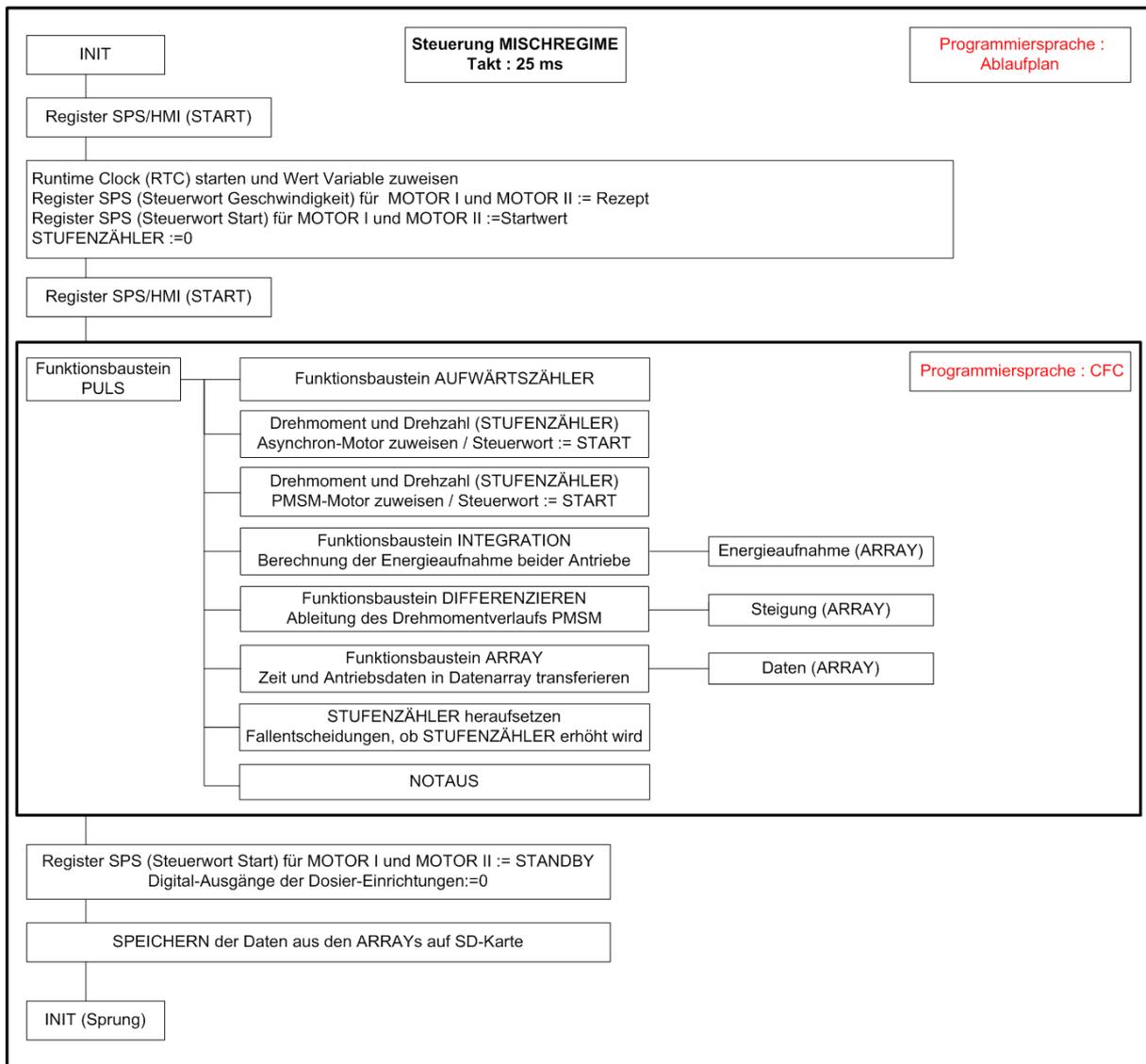


Bild 4.8: Ablaufplan des Anwenderprogrammes für die Abarbeitung des vorgegebenen Mischregimes



Bild 4.9: CFC-Programm zur Speicherung der aktuellen Stufe [0-7], die während des tatsächlichen Mischvorgangs im Takt von 250 ms festgehalten wird.

Mit Drücken der Taste **MENU** werden die den Tasten F1 - F5 hinterlegten Menüpunkte angezeigt (Bild 4.10). Die Menüpunkte **MISCHREGIME** und **RHEOLOGIE** sind mit einem weiteren Untermenü versehen.

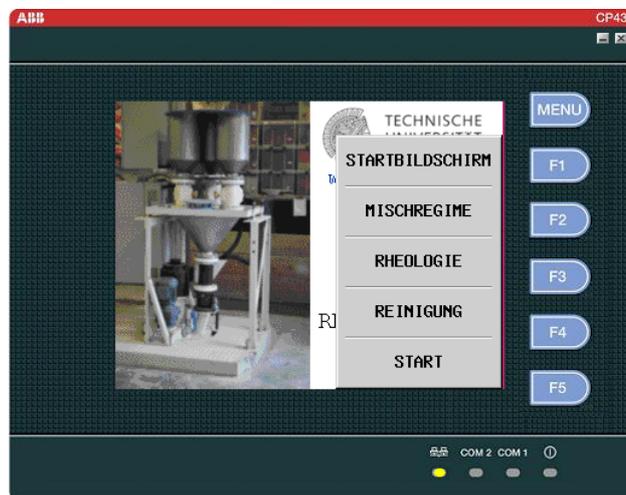


Bild 4.10: Startbildschirm der HMI-Steuerung mit eingeblendetem MENÜ

Die Eingabe erfolgt durch Berühren der entsprechenden Eingabezelle (z.B. die blau hinterlegten Felder in Bild 4.7) Daraufhin öffnet sich der in Bild 4.11 dargestellte Ziffernblock.

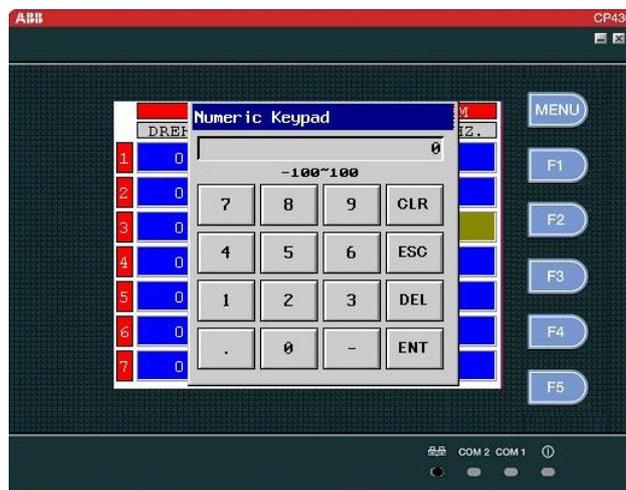


Bild 4.11: Eingabe der Daten in die HMI-Steuerung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden auch modifizierte Abstreifer eingesetzt, die das Mischgut im Gegenstrom auf das innere Mischwerkzeug lenken. Der dadurch initiierte Materialstrom kann, in der kohäsiven Phase des Mischgutes, den Antrieb des inneren Mischwerkzeugs überlasten.

Um dies zuverlässig zu vermeiden, kann das Drehmoment des Abstreifer-Antriebes (ASM) ebenfalls begrenzt werden (Bild 4.12). Übersteigt das Drehmoment die Vorgabe, wird die Drehzahl des Motors durch den Frequenzumrichter und somit auch der Materialstrom auf das innere Mischwerkzeug reduziert. Die Geschwindigkeit des Abstreifers ist somit innerhalb der Stufen nicht statisch, sondern passt sich selbstregelnd den Bedürfnissen während des Mischvorganges an.

Die wählbaren Abbruchkriterien für die Beendigung der einzelnen Stufen sind:

- Zeitvorgabe (Eingabe als DAUER in Bild 4.7)
- Energiemenge, die von den beiden Frequenzumrichtern der Antriebe aufgenommen wurde
- Steigung des Drehmoment-Verlaufs

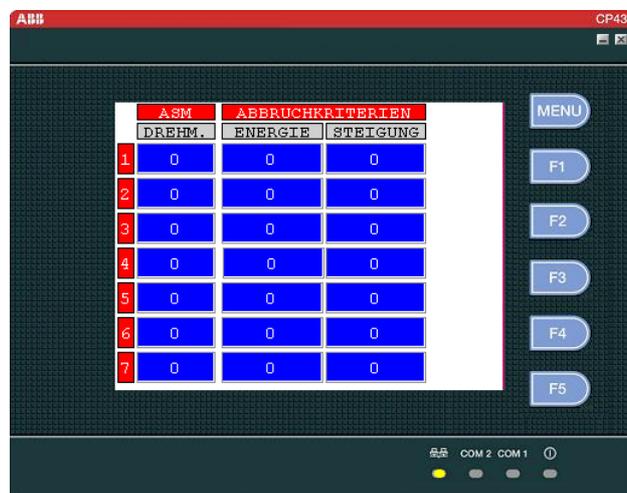


Bild 4.12: Drehmomentvorgabe für den Getriebemotor des Abstreifers sowie Abbruchkriterien für die einzelne Stufen des Mischregimes

Dosier-Einrichtung: Die Verschlüsse der drei Behälter (Quetschventile) und die Zellenradschleuse können mit einer wählbaren Verzögerung in Sekunden zu Beginn jeder Stufe frei geschaltet werden. Die Drehzahl der Zellenradschleuse und damit die Dosiergeschwindigkeit kann in 1 Prozent-Schritten vorgegeben werden (Bild 4.13).

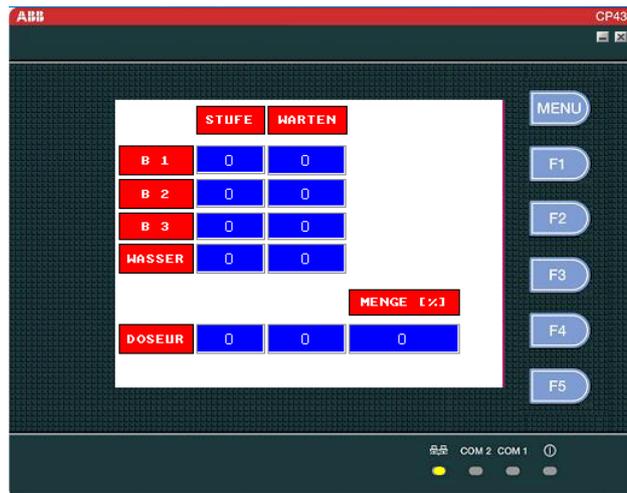


Bild 4.13: Vorgaben für die Dosier-Einrichtungen

Während des Mischvorgangs sind die aktuelle STUFE, die durch den Temperatursensor im Mischer erfasste aktuelle TEMPERATUR, die aktuellen DREHZAHLEN des inneren Mischwerkzeugs und des Antriebs des Abstreifers, die verstrichene MISCHZEIT, die bisher eingebrachte MISCHENERGIE in kWs und der Status (Ein/Aus) der einzelnen DOSIEREINRICHTUNGEN ablesbar (Bild 4.14). Der Drehmomentverlauf des inneren Mischwerkzeugs während des Mischvorgangs wird in einem Laufdiagramm dargestellt. Durch Betätigung der Schaltfläche WEITER wird die gegenwärtige STUFE manuell beendet und die nachfolgende Stufe abgearbeitet.

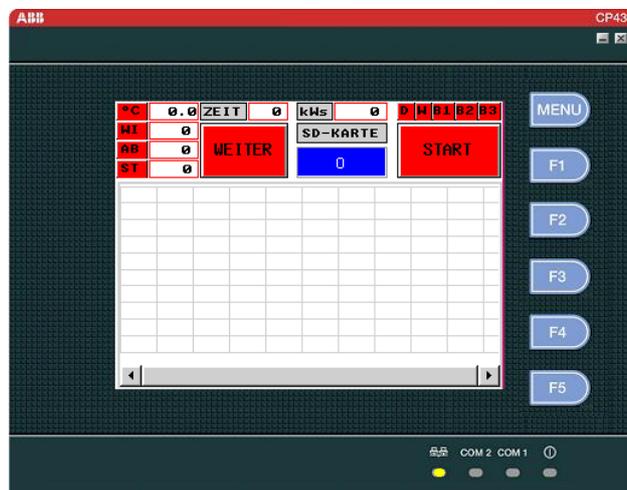


Bild 4.14: Drehmomentverlauf während Mischvorgang sowie Status der Antriebe und Dosier-Einrichtungen

Der Abstreifer und das innere Mischwerkzeug können in beiden Drehrichtungen manuell betrieben werden, um z.B. die Reinigung zu ermöglichen (Bild 4.15). Durch die Taster können die Drehzahlen in 5 Prozent-Schritten verändert werden.

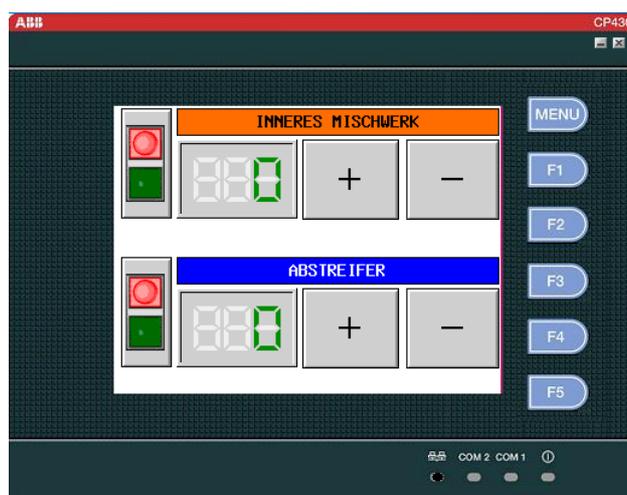


Bild 4.15: Manueller Betrieb z.B. für die Reinigung

### 4.3 Drehzahl-Regelung (Baugruppe 2)

Es existieren zahlreiche Antriebsschaltungen für die unterschiedlichen Motortypen, um die Mindestanforderungen der Antriebstechnik wie Anlaufen, Bremsen sowie Änderungen von Drehzahl und Drehmoment umzusetzen. Für das netzschonende Anlassen der Motoren sind z. B. die Stern-Dreieck-Anlaßschaltung oder die KUSA-Schaltung (**K**urzschluss-**S**anftanlauf) zu nennen. Die Drehzahl- und Drehmomentänderung kann durch polumschaltbare Motoren oder die Dahlanderschaltung in festen Verhältnissen herbeigeführt werden.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Mischregime verlangen den Betrieb der Mischwerkzeuge bei variabler Drehzahl und/oder variablem Drehmoment. Die Erfassung rheologischer Parameter im Mischer verschärft das Anforderungsprofil weiter. Neben dem kontrollierten Betrieb des Hauptantriebs bei niedrigsten Drehzahlen ist zudem ein drehmomentgeführter Modus wünschenswert.

Nur unter Einsatz von Frequenzumrichtern kann die erforderliche Variabilität erreicht werden.

Die Drehzahl  $n_d$  des Drehfeldes im Ständer eines Asynchron-Motors ist abhängig von der Frequenz  $f_1$  und der Polpaarzahl  $p$ . Die Verringerung der Frequenz  $f_1$  bewirkt eine proportionale Verringerung der Drehzahl  $n_d$ .

$$n_d = \frac{f_1}{p} \quad (\text{Gl. 4.1})$$

Allerdings treten beim Asynchronmotor Strom, Spannung, Ständerfrequenz  $n_d$  und Drehzahl  $n$  als moment- und flußbildende Größen auf. Der magnetische Fluss lässt sich aufgrund des transformatorischen Prinzips des Motors nicht direkt beeinflussen, sondern nur durch das Zusammenwirken der vier Größen [74]. Wird nur die Frequenz  $f_1$  verringert, hat dies Auswirkungen auf den magnetischen Fluss.

Die Fläche unter der Spannungskurve (Spannungs-Zeit-Fläche) verdoppelt sich bei 25 Hz gegenüber der Netzfrequenz von 50 Hz. Damit verdoppelt sich auch der Fluss und bewirkt gemäß Gleichung 4.2 in einem Asynchron-Motor ein erhöhtes inneres Moment  $M_i$ .

$$M_i \sim \Phi_d \cdot I_2 \quad (\text{Gl. 4.2})$$

Bei Umrichterbetrieb im Grunddrehzahlbereich bis zur Bemessungsfrequenz des Motors muss deshalb, mit der Absicht die Läuferdrehzahl zu verstellen, neben der Speisefrequenz  $f_1$  auch die Drehfeldspannung  $U_1$  frequenzproportional verändert werden. Nur bei konstantem Verhältnis  $U/f$  ist der Motor richtig magnetisiert (konstanter magnetischer Fluss) [74].

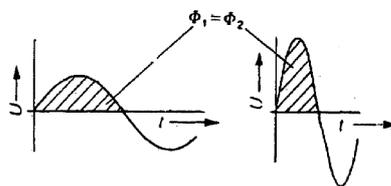


Bild 4.16: Konstanter Fluss (Spannungs-Zeit-Fläche) bei zwei Frequenzen (z.B. 25 und 50 Hz) [74]

Die Kennlinie eines Asynchronmotors im Umrichterbetrieb ist in Bild 4.17 dargestellt. Im Grunddrehzahlbereich (Spannungsstellbereich) ist das Moment konstant, die Leistung  $P$  steigt mit der Frequenz  $f$  und der Spannung  $U$  an. Im Bereich niedriger Frequenzen wird infolge erhöhter Verluste die Spannung angehoben (Boost), um einen konstanten magnetischen Fluss zu gewährleisten. Bei der Bemessungsfrequenz  $f_N$  erreicht die Drehfeldspannung ihr Maximum. Bei einer weiterer Erhöhung der Speisefrequenz (Feldschwächebereich) steigt die Läuferdrehzahl weiter, aber die Spannungen kann nicht weiter erhöht werden. Infolge dessen sinkt der magnetische Fluss und damit auch das Drehmoment. Der Schlupf  $s$  nimmt mit sinkender Läuferdrehzahl überproportional zu.

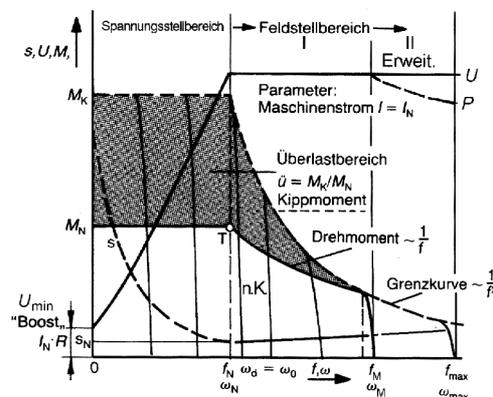


Bild 4.17: Drehmomentgrenzkennlinien  $M_N$  und  $M_K$  und Schlupfverlauf  $s$  eines Drehstrom-Asynchronmotors bei Umrichterbetrieb [74]

Werden die Verluste im Ständer vernachlässigt, wird die zugeführte elektrische Wirkleistung  $P_{el}$  in einem **Synchronmotor** über den Luftspalt als Drehfeldleistung  $P_d$  auf den Läufer übertragen und über die Motorwelle als mechanische Leistung  $P_{mech}$  abgegeben [74]. Nach BÖHM [75] ist das Drehmoment  $M_i$  eines Synchronmotors linear proportional zur Speisespannung  $U_1$ .

$$M_i \sim U_1 \quad (\text{Gl. 4.3})$$

Im Grunddrehzahlbereich müssen zur Aufrechterhaltung eines konstanten magnetischen Flusses  $\Phi$  die Speisefrequenz  $f$  und die Speisespannung  $U_1$  mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  steigen. Um den Drehzahlbereich zu erweitern, kann auch der Synchronmotor im Feldschwächebereich betrieben werden. Dem in dieser Arbeit eingesetzten permanentmagneterregten Synchronmotor (PMSM) muss dazu eine gegenmagnetisierende Stromkomponente im Ständer eingepreßt werden, die die Polradmagnetisierung schwächt [74]. Nach BROSCHE [74] kann ein PM-Synchronmotor an einem Frequenzumrichter mit feldorientierter Regelung ohne Lagegeber (sensorless) von Drehzahl null bis zur Maximaldrehzahl betrieben werden.

Für die Änderung der Läuferdrehzahl durch eine nach Frequenz und Amplitude veränderliche Spannung, werden die wichtigsten Verfahren mit ihren Vor- und Nachteilen nachfolgend beschrieben:

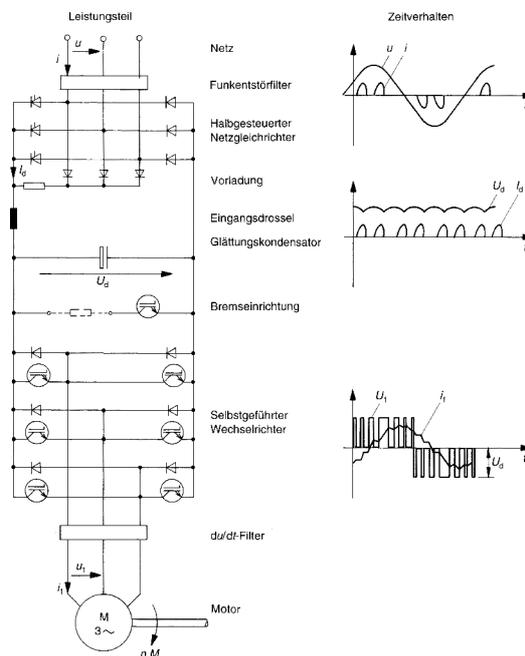


Bild 4.18: Funktionsbaugruppen eines Frequenzumrichters mit Spannungszwischenkreis [75]

Bild 4.18 zeigt die Funktionsbaugruppen eines Umrichters mit Spannungszwischenkreis. Der halbgesteuerte Netzgleichrichter erzeugt die Gleichspannung  $U_d$  im Zwischenkreis, die im Zwischenkreiskondensator geglättet wird. Der Kondensator ist in der Lage, kurze Belastungsspitzen zu puffern und ermöglicht somit eine Spannungsquelle mit nahezu konstanten Ausgangswerten. Die zwischen Netzgleichrichter und Kondensator befindli-

che Spule glättet den Kurvenverlauf des nicht sinusförmigen Netzstromes. Um das Abbremsen des Motors zu ermöglichen, ohne die Zwischenkreisspannung durch Rückspeisung durch den Motor auf unzulässige Werte zu steigern, kann ein sogenannter Bremschopper angeschlossen werden. Die elektrische Energie wird dabei über einen Widerstand in Wärme umgesetzt.

Dem Pulswechselrichter kommt nun die Aufgabe zu, die Gleichspannung aus dem Zwischenkreis zyklisch so auf die Drehstromstränge zu verteilen, dass ein Drehfeld mit der richtigen Frequenz und Amplitude entsteht. Die für die Drehzahlverstellung des Läufers erforderliche variable Ausgangsspannung und Frequenz wird durch Pulsen der konstanten Zwischenkreisspannung erreicht. Durch das regelbare Verhältnis Puls/Pause wird der Mittelwert der Ausgangsspannung festgelegt. Ein schmaler Puls, also das Ausblenden eines großen Teils der Spannungs-Zeit-Fläche, führt zu einer geringen Ausgangsspannung, während mit zunehmender Breite des Pulses die Spannung steigt. Unterschieden wird dabei weiter in Pulse mit konstanter Weite (konstante **Puls-Weiten-Modulation**), und die sinusbewertete Pulsung. Reicht die Rundlaufgüte bei niedrigen Drehzahlen nicht aus, wird durch variable Pulsweite bewirkt, dass die Ströme nahezu sinusförmig fließen.

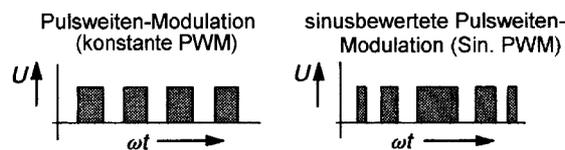


Bild 4.19: Konstante PWM mit gleichem Puls-Pausen-Abstand (links); sinusbewerteter Puls-Pausen-Abstand (rechts) [74]

Bild 4.20 zeigt die Auswirkungen der Pulsung in Abhängigkeit vom Pulsverfahren und der Schaltfrequenz der Wechselrichter. Bei sinusförmiger Pulsung mit hohen Schaltfrequenzen ergeben sich nahezu sinusförmige Verläufe der Ströme und runde Drehfelder, die allerdings im Umrichter zu erhöhten Schaltverlusten führen.

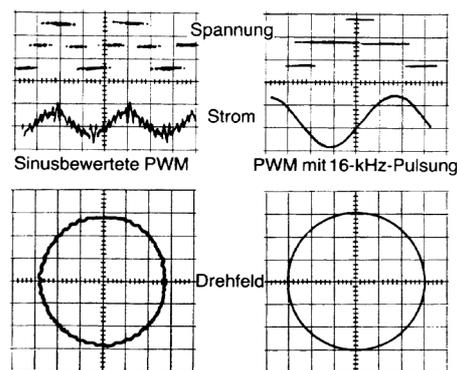


Bild 4.20: Oszillogramme von Strom, Spannung und Drehfeld für verschiedene Arten der Ansteuerung [74]

Zusätzlich ist die Annäherung an den sinusförmigen Verlauf abhängig von der Frequenz  $f$  des Umrichters. Bei niedrigen Frequenzen lässt sich die Sinusform durch eine hohe Anzahl an Pulsen gut anpassen. Mit steigender Frequenz sinkt die Anzahl der Pulse und somit auch die Güte der Annäherung (Bild 4.21).

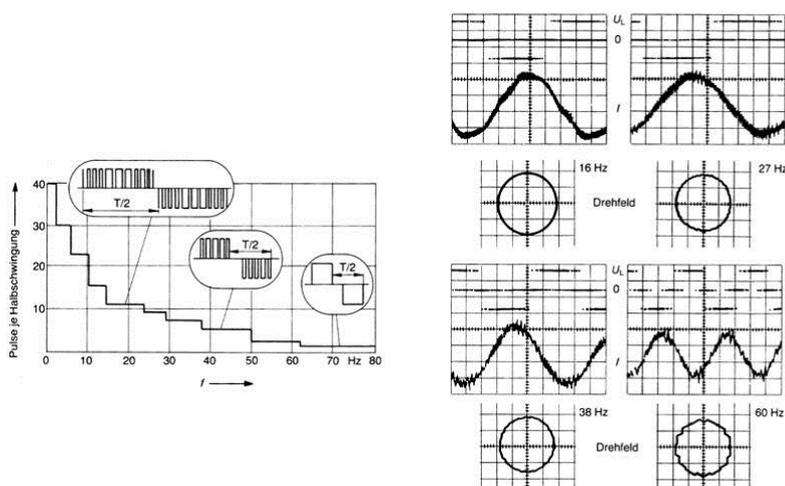


Bild 4.21: Verlauf der Pulse über die Ausgangsfrequenz (links); Oszillogramme bei verschiedenen Ausgangsfrequenzen mit Drehfelddarstellung [74]

Um den gewünschten konstanten magnetischen Fluss über den gesamten Drehzahlbereich zu erreichen, gibt es zahlreiche Verfahren, die sich im Aufwand für die Steuerungs- und Regelelektronik unterscheiden.

### U/f-Kennliniensteuerung mit (IxR)-Kompensation

Dieses einfache Verfahren wird häufig für Anwendungen mit geringen Ansprüchen an die Regeldynamik eingesetzt [74]. Da bei sehr niedrigen Motordrehzahlen der ohmsche Widerstand der Motorwicklungen nicht mehr zu vernachlässigen ist, wird vom linearen Zusammenhang  $U/f$  im unteren Drehzahlbereich abgewichen und die Spannung zur Kompensation angehoben. Die  $U/f$ -Kennlinie selbst kann im Umrichter sowohl für den Grunddrehzahlbereich bis  $n$ , als auch für den Feldschwächebereich auf den Antrieb angepasst werden. Anfällig ist dieses einfache Verfahren für Störgrößen im laufenden Betrieb. BROSCH [74] nennt beispielhaft den Wicklungswiderstand, der abhängig vom Belastungszustand variiert und in der beschriebenen  $U/f$ -Kennliniensteuerung nicht berücksichtigt wird.

### Feldorientierte Regelung (Vektor-Regelung)

Die feldorientierte Regelung (FOR) unterscheiden sich durch das gewählte Bezugskordinatensystem und das eingesetzte Motormodell.

Mit einem Motormodell - einem elektrischen Ersatzschaltbild des Motors - wird aus den gemessenen Größen Ständerspannung und Ständerstrom der magnetische Fluss  $\phi_2$  im Läufer und der Ständerstrom  $\underline{i}$  berechnet. Der Ständerstrom  $\underline{i}$  wird dann im ständerfesten Bezugssystem nach Betrag und Ausrichtung dargestellt (Bild 4.22).

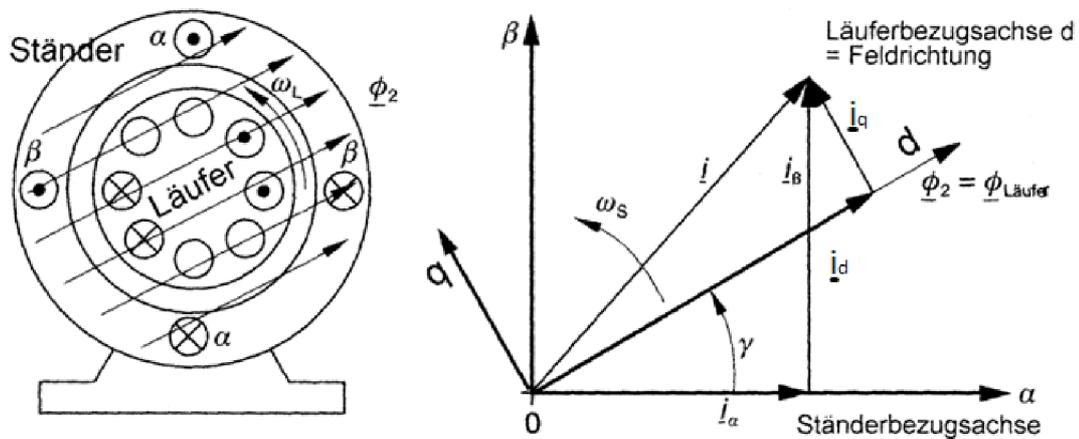


Bild 4.22: Drehstrom-Asynchronmotor mit Koordinatensystemen für die feldorientierte Regelung. Bezugsfeldrichtung  $\underline{\Phi}_2$  im Ständerbezugssystem  $(\alpha, \beta)$  und Läuferbezugssystem mit den Stromkomponenten  $\underline{i}_d$  und  $\underline{i}_q$  im läuferflussorientierten System (feldorientiert  $d, q$ ) [74]

In einem zum Läuferfluss ausgerichteten Koordinatensystem  $(d, q)$  wird der Ständerstrom dann vektoriell in  $\underline{i}_q$  und  $\underline{i}_d$  zerlegt.

Die zum Läuferfluss  $\Phi_2$  parallele Stromkomponente  $\underline{i}_d$  ist flussbildend, die dazu senkrecht verlaufende Komponente  $\underline{i}_q$  ist drehmomentbildend. Damit stehen zwei getrennte Regelkreise für den Fluss und das Drehmoment zur Verfügung. Nach dem Soll/Ist-Abgleich erfolgt die Ansteuerung der Leistungstransistoren im Modulationsverfahren. Asynchron-Motoren werden im Grunddrehzahlbereich auf konstanten Fluss geregelt und das erzeugte Drehmoment somit, als Produkt aus  $\underline{i}_q$  und  $\underline{i}_d$ , durch die Komponente  $\underline{i}_q$  bestimmt.

Permanentmagneterregte Synchronmotoren benötigen keine Fremderregung, somit wird die Komponente  $\underline{i}_d$  im Grunddrehzahlbereich auf null geregelt.

Böhm [75] beschreibt, dass zahlreiche feldorientierte Regelverfahren mit verschiedenen Motor-Modellen eingesetzt werden. Aussagen zur Regelgüte sind neben dem eingesetzten Verfahren auch von ggf. eingesetzten Gebersystemen abhängig und in der Praxis schwer zu erhalten.

### Direct Torque Control (DTC)

Dieses Verfahren unterscheidet sich grundlegend von den zuvor beschriebenen Verfahren durch den Verzicht auf den Modulationsbaustein (Bild 4.23). Zudem ist die Koordinatentransformation der Vektor-Regelung nicht erforderlich. Die Schaltvorgänge der Leistungstransistoren werden in einem raumfesten Koordinatensystem so geschaltet, dass der magnetische Fluss und das Drehmoment direkt und unabhängig voneinander in einem engen Toleranzband gehalten werden können.

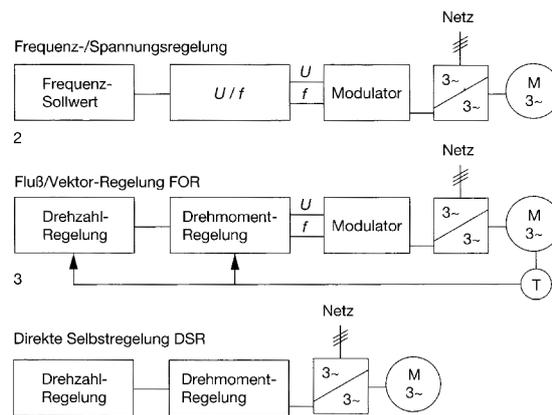


Bild 4.23: Drehmoment-Regelverfahren in der Gegenüberstellung [74]

Ein Motormodell bestimmt nach Eingabe der grundlegenden Motordaten wie Leistung, Motornennzahl, Motortyp etc. durch einen Messvorgang die tatsächlich vorhandenen physikalischen Gegebenheiten wie z. B. die Wicklungswiderstände.

Das Motormodell berechnet in 25  $\mu$ s-Intervallen den magnetischen Ständer-Fluss und das Drehmoment aus dem gemessenen Motorstrom und der gemessenen Motorspannung. Zwei unabhängige Hysterese-Regler (Toleranzband-Regler) bestimmen die Differenzen zwischen den berechneten Ist-Werten und den Soll-Werten für den magnetischen Fluss und das Drehmoment.

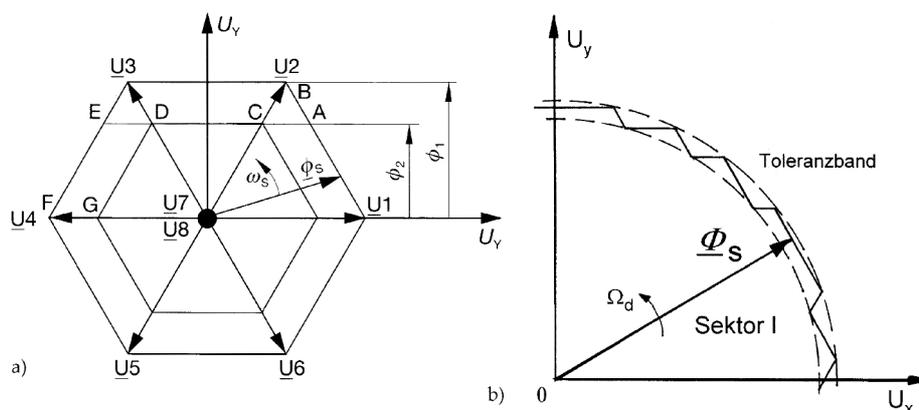


Bild 4.24: a) Raumzeiger-Diagramm;  $\Phi_1$  voller Fluss (A-B) und (E-F usw.); Feldschwächung (C-D-G usw.);  $\Phi_s$  Ständerflussraumzeiger; umlaufend mit  $\omega_s$ ; b) Toleranzband für die Flussvorgabe [74]

Die 6 aktiven Raumzeiger der Ausgangsspannungen und der spannungsgespeiste DTC-Regelkreis eines PMSM sind in Bild 4.24 dargestellt. Jeder Raumzeiger spannt dabei einen Sektor mit  $\pm 30$  Grad auf. Da die Ausrichtung des Ständerfluss-Raumzeigers bekannt ist, können die Ergebnisse der beiden Hysterese-Regler genutzt werden, um die Raumzeiger bzw. die IGBT (**I**nsulated **G**ate **B**ipolar **T**ransistoren) optimal zu schalten. Dabei werden sogenannte Lookup-Tabellen eingesetzt, in denen für bestimmte Konstellationen die jeweilige optimale Schaltanweisung hinterlegt ist. Befindet sich beispielsweise der zu erhöhende Ständerfluss-Raumzeiger im ersten Sektor und  $\underline{U}_3$  wird eingeschaltet, erfolgt eine Bewegung des Flusszeigers  $\Phi_s$  von A nach B. Die Geschwindigkeit der Bewegung (Frequenz) wird durch abwechselndes Pulsen der Nullspannungszeiger  $\underline{U}_7$  oder  $\underline{U}_8$  und des Spannungsraumzeiger  $\underline{U}_3$  erreicht. Die Schaltvorgänge verändern Motorspannung und Motorstrom und damit Dreh-

moment und Ständerfluss. Die aktuellen Werte für Motorstrom und Motorspannung bilden die Eingangsgrößen für das Motormodell und schließen damit den Regelkreis.

Da bei dem eingesetzten PMSM-Antrieb keine Fremderregung erforderlich ist, wird die Stromkomponente  $i_d$  zu null geregelt.

#### 4.4 Antrieb und Untersetzung (Baugruppen 3 und 4)

Bis vor 25 Jahren dominierte der Gleichstrommotor trotz des wartungsintensiven Bürstenapparats und des empfindlichen Stromwende-Systems bei drehzahlverstellbaren Anwendungen [74]. Durch den Einsatz von Frequenzumrichtern und deren stetige Weiterentwicklung können Drehstrommotoren kostengünstig drehzahl geregelt betrieben werden und sind nicht mehr an die in Europa vom öffentlichen Netz vorgegebene Drehfrequenz von 50 Hz gebunden. Frequenzumrichter (FU) erzeugen dazu ein frequenz- **und** spannungsvariables Netz.

Der Aufbau von Drehstrommotoren ist grundsätzlich ähnlich und kann in die Hauptbestandteile Ständer (Stator, Primärteil) und Läufer (Rotor, Sekundärteil) unterteilt werden. Im Ständer ist eine dreisträngige Drehstromwicklung (Arbeitswicklung) untergebracht, die an das Netz oder einen FU angeschlossen wird. Die gegeneinander um  $120^\circ$  verschobenen Ströme des Drehstromes erzeugen im Ständer ein Drehfeld  $\Phi_d$ , das berührungslos über den Luftspalt auf den Läufer wirkt [74].

$$\Phi_d = \frac{c_1 \cdot U_1}{f_1} \quad (\text{Gl. 4.4})$$

Die Konstante  $c_1$  setzt sich aus dem Wicklungsfaktor (Wicklungsverteilung), der Wicklungszahl  $w_1$  und dem Faktor  $(2\pi/\sqrt{2})$  zusammen und ist durch die Konstruktion festgelegt. Die Strangspannung  $U_1$  und die Frequenz  $f_1$ - und somit das Drehfeld  $\Phi_d$  - können im Betrieb geändert werden. Das innere Drehmoment entsteht durch Kräfte, die in einem magnetischen Feld auf stromdurchflossene Leiter wirken. Das Drehfeld  $\Phi_d$  ist somit eine der drehmomentbildenden Größen.

Der **Asynchron-Motor** heute üblicher Bauart verfügt über einen sogenannten Kurzschlussläufer (Bild 4.25)

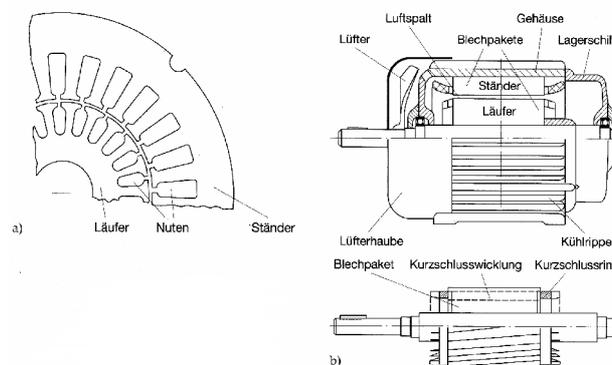


Bild 4.25: Drehstrom-Asynchronmotor: a) Ständer- und Läuferblechschnitte. b) Längsschnitt durch den Motor und einen Läufer [74]

Hierbei liegen in den Läufernten Stabwicklungen, die an den Enden über Ringe kurzgeschlossen sind. Als Vorteile sind die sehr kostengünstige Herstellung, die hohe Belastbarkeit des Läufers und die drehmomentbildenden Eigenschaften, unabhängig von der Polzahl des Ständers, zu nennen.

Der Läufer dreht sich nicht exakt mit der durch die Netzfrequenz  $f$  und die Polpaarzahl  $p$  festgelegten Drehfeld-drehzahl:

$$n_d = \frac{f}{p} \quad (\text{Gl. 4.5})$$

Damit im Läufer Spannungen induziert werden können und ein drehmomentbildender Strom fließen kann, muss dieser gegenüber dem Statorfeld geringfügig langsamer rotieren. Aus diesem asynchronen Umlauf der Motorwelle leitet sich die Bezeichnung Asynchron-Motor ab. Bei einem Asynchron-Motor muss der Spalt zwischen Ständer und Läufer möglichst gering sein, da diese Erregerleistung als Blindleistung aus dem Drehstromfeld entnommen wird. Der Schlupf  $s$  ist ein relatives Maß und gibt den Unterschied zwischen Drehfeldzahl  $n_d$  und der Läuferdrehzahl  $n$  wieder:

$$s = \frac{n_d - n}{n_d} \quad (\text{Gl. 4.6})$$

Für die Läuferfrequenz  $f_2$  gilt:

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad (\text{Gl. 4.7})$$

Der Läuferstrom kann vereinfacht angenommen werden zu:

$$I_2 = \frac{f_2 \cdot \Phi_d}{Z_2} \quad \text{mit } Z_2 = \text{Scheinwiderstand der Rotorwicklung} \quad (\text{Gl. 4.8})$$

Für das innere Drehmoment gilt:

$$M_i = c_m \cdot I_2 \cdot \Phi_d \cdot \cos \varphi \quad (\text{Gl. 4.9})$$

$\cos \varphi$  gibt die Phasenverschiebung zwischen Läuferstrom  $I_2$  und Drehfeld  $\Phi_d$  an, während  $c_m$  eine durch die Konstruktion und Wicklungsart festgelegte Konstante ist. Die an der Motorwelle anliegende mechanische Leistung  $P_2$  berechnet sich unter Vernachlässigung von Verlusten mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega = 2 \pi n$  aus dem inneren Moment  $M_i$  zu:

$$P_2 = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M_i \quad \text{mit } n = \text{Läuferdrehzahl} \quad (\text{Gl. 4.10})$$

Der Aufbau eines **Synchron-Motors** unterscheidet sich vom Asynchron-Motor durch den Aufbau der Läufer, der mit der Synchrodrehzahl  $n_d$  rotiert. Da somit im Läufer keine Spannungen und Ströme induziert werden können, muss die Erregerleistung von außen zugeführt werden.

Alternativ können anstatt der Erregerwicklungen auch Dauermagnete im Läufer verbaut werden um das Erregerfeld zu erzeugen. Für diese permanentmagneterregten Drehstrom-Synchronmotoren (**Permanent-Magnet Synchronous Machine**) werden Magnete aus sogenannten "Seltene Erden", vorrangig Samarium ( $\text{SmCo}_5$ ), Neodymium (Nd) oder Praseodymium (Pr), verbaut. Die hochpreisigen Dauermagnete müssen vor dem Betrieb bei Temperaturen unter  $-30^\circ$  Celsius, thermischer Überlastung und Stromspitzen gesichert werden, da eine irreversible Entmagnetisierung die Folge wäre.

Die zahlreichen Vorteile gegenüber dem Asynchron-Motor führen in der Praxis dennoch zu stark steigenden Marktanteilen:

- hohe Leistungsdichte
- sehr hoher Wirkungsgrad auch bei hoher Polzahl und damit kleiner Nenndrehzahl
- geringere Verluste, da kein Magnetisierungsstrom fließt
- keine Magnetisierungsverzögerung
- Polradwinkel  $\vartheta$  kann null werden
- keine Schlupfkompensation erforderlich, da synchrone Drehzahl

Im laufenden Betrieb nimmt das rotierende Ständerdrehfeld  $\Phi_d$  die Pole synchron mit, allerdings läuft der Rotor - in Abhängigkeit vom abgegebenen Drehmoment - um den Polradwinkel  $\vartheta$  nach. Wird das Kippmoment überschritten, fällt der Rotor außer Tritt und läuft entweder asynchron weiter oder bleibt stehen.

### **4.5 Mischwerkzeug (Baugruppe 5)**

Bild 4.26 zeigt die für die jeweiligen Mischaufgaben empfohlenen Mischorgane des Intensiv-Mischers Typ Eirich [76]. Das Mischwerkzeug zur Herstellung von Suspensionen wird als Stiftrührer bezeichnet und unterscheidet sich deutlich vom Standardwerkzeug.

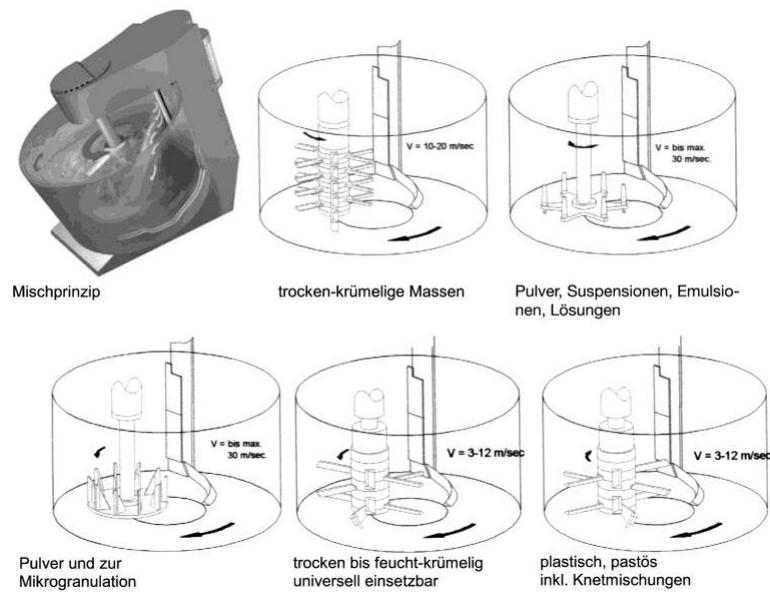


Bild 4.26: Einsatzgebiet der Eirich Mischorgane [76]

Um möglichst schnell und einfach Veränderungen am Mischwerkzeug des KKM-R 30 vornehmen zu können, wurde ein variables, steckbares Mischwerkzeug entwickelt. Dabei können Aufschiebteile torsionssteif auf einer Keilwelle aufgeschoben und gegeneinander verspannt werden. Bei den Aufschiebteilen handelt es sich um Serienprodukte, an die die gewünschten Werkzeuge angeschweißt werden können. Zwei mögliche Umsetzungen sind in Bild 4.27 dargestellt. Damit konnten die Auswirkungen geänderter Werkzeuggeometrien auf das Mischergebnis aufgezeigt werden.

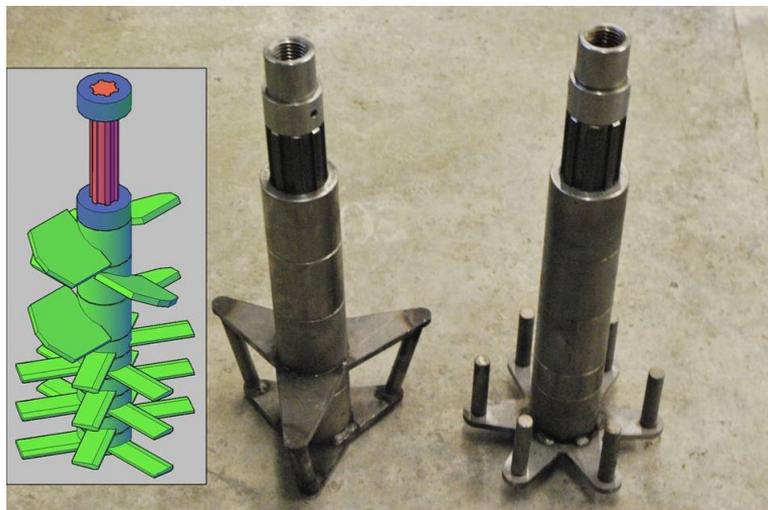
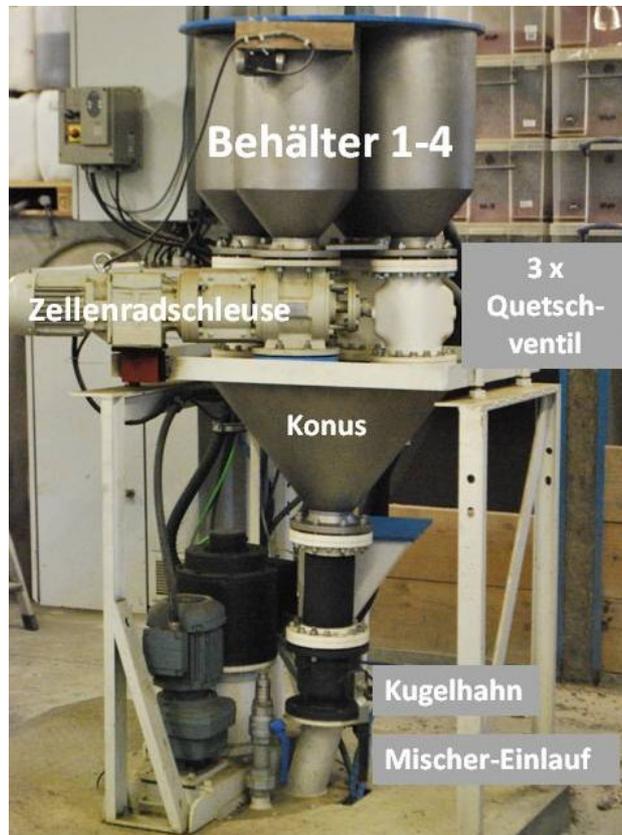


Bild 4.27: variables, steckbares Mischwerkzeug; links 3D-Modell, Mitte und rechts Beispiele

#### 4.6 Dosiereinrichtung

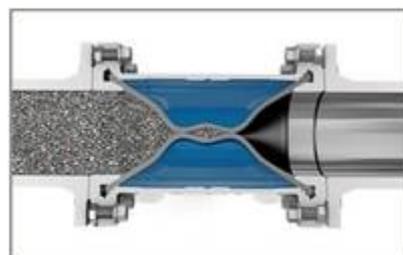
Um Mischregime umzusetzen, bei denen einzelne Ausgangsstoffe zeitverzögert zugegeben werden können, ist eine Dosiereinrichtung erforderlich, die in die Steuerung der Mischanlage integriert ist. Durch die rechnerische

Bestimmung der Stabilisationszeit mit BétonLAB Pro (Kapitel 5.4) konnte eine sinnvolle Zugabe-Reihenfolge für die Ausgangsstoffe festgelegt werden. Damit ergeben sich maximal 3 Ausgangsstoffe, die dem Mischer zeitgesteuert vollständig zugegeben werden und ein Ausgangsstoff, der kontinuierlich in vorgegebener Menge zugegeben wird. Die Umsetzung ist in Bild 4.28 dargestellt.



*Bild 4.28: Dosier-Einrichtung für den KKM-R 30*

In drei Behältern können die Ausgangsstoffe in der entsprechenden Menge vorgelegt werden. Durch die elektro-pneumatisch betätigten Quetschventile (Bild 4.29) können die Auslässe geöffnet werden, wodurch das Material über den Konus in den Mischer geleitet wird. Das jeweilige Magnetventil zur Steuerung des Quetschventils wird durch die SPS – und somit durch das hinterlegte Mischregime - angesteuert. Für die kontinuierliche Dosierung einer Komponente wird das ebenfalls vorgelegte Material in einem Behälter mit einer Zellenradschleuse über den Konus in den Mischer geleitet. Der Betrieb und die Drehzahl der Zellenradschleuse werden ebenfalls durch die SPS - in Abhängigkeit vom Mischregime - gesteuert.



*Bild 4.29: Pneumatisches Quetschventil der AKO GmbH*

## 5 Experimentelle Verfahren

### 5.1 LCPC Box

Wenngleich der Setzfließversuch zur Beschreibung der Verarbeitbarkeit und zur Qualitätskontrolle geeignet ist, korrelieren die Messwerte nicht mit der Fließgrenze des Materials in absoluten Einheiten. Ursächlich ist der Einfluss des Größtkorn-Durchmessers der Gesteinskörnung auf das Setzfließmaß. Der Fließvorgang endet, wenn die Höhe der fließenden Probe das Niveau des Größtkorn-Durchmessers erreicht hat. Ein SVB mit kleinerem Größtkorn-Durchmesser erzielt im Setzfließversuch deshalb höhere Werte als ein SVB mit identischer Fließgrenze, aber größerem Größtkorn-Durchmesser.

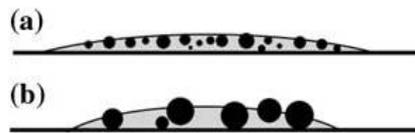


Bild 5.1: Die Fließgrenze beider SVB ist identisch, dennoch hat SVB (a) wegen kleinerem Größtkorn ein höheres Setzfließmaß [7]

Untersuchungen von [7] belegen die Richtigkeit dieser Annahmen. Verschiedene selbstverdichtende Betone mit unterschiedlichem Größtkorn-Durchmesser verfügten über Setzfließmaße von  $700 \text{ mm} \pm 50 \text{ mm}$ , während die Messungen mit dem Beton-Rheometer BTRHEOM um bis zu Faktor 5 voneinander abweichende Fließgrenzen in absoluten Einheiten lieferten.

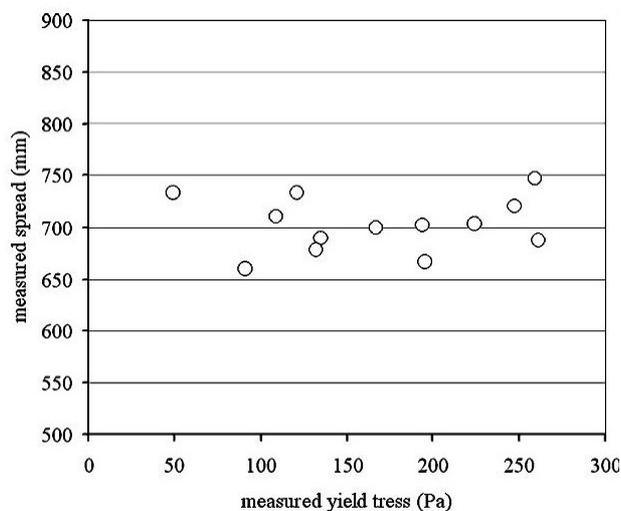


Bild 5.2: Einfluss des Größtkorn-Durchmessers auf die mit dem Beton-Rheometer BTRHEOM gemessenen Fließgrenzen (Pa) und die zugehörigen Setzfließmaße verschiedener SVB [7]

Somit existiert keine Korrelation zwischen Fließgrenze und Setzfließmaß. Die von [77] beschriebene analytische und experimentelle Korrelation von Fließgrenze und Ausbreitmaß für Zementleim im ASTM Mini-Konus ist somit nicht auf Beton und die Bestimmung des Setzfließmaßes übertragbar.

ROUSSEL [7] fordert eine Probenhöhe von mindestens dem 5-fachen Größtkorn-Durchmesser am äußeren Rand, um den ungestörten Fließvorgang eines homogenen Materials annehmen zu können.



Bild 5.3: Langsames Einfüllen eines SVB in die LCPC Box [7]

Das Probevolumen im Setzfließversuch müsste dazu auf mindestens 300 Liter erhöht werden. Unter Beibehaltung einer handhabbaren Probemenge wurde deshalb die LCPC Box entwickelt. Diese besteht aus einer 120 cm langen, 20 cm breiten und 15 cm hohen Schalung, in die 6 Liter SVB an einem Ende eingefüllt werden. Da die Breite der Schalung lediglich 20 cm beträgt, findet der Fließvorgang hauptsächlich in eine Richtung statt und bewirkt eine deutlich höhere Schichtdicke der Probe. Übersteigt die durch schnelles Einfüllen verursachte Scherspannung die Fließgrenze der Probe, fließt diese weiter als für den Fall, dass die Fließgrenze nicht überschritten wird. Die Probemenge soll deshalb über 30 Sekunden gleichmäßig eingefüllt werden, um diesen Effekt zu vermeiden.

NGUYEN et al. [78] haben eine analytische Lösung für die Fließvorgänge in einer Rinne erarbeitet und diese an Kalksteinmehl-Suspensionen validiert. Die Fließgrenzen der Suspensionen wurden zusätzlich mit einem (Leim-)Rheometer Typ Haakke VT550 bestimmt und bestätigten die Berechnungen. Da die existierenden Beton-Rheometer mindestens eine Grundvoraussetzung zur Bestimmung von Absolutwerten nicht erfüllen [7], wurden keine Vergleiche zwischen den berechneten Absolutwerten von (Beton-)Rheometern und der analytischen Berechnung für Betone vorgenommen. Da bei der LCPC Box alle Randbedingungen zur Bestimmung von Absolutwerten vorliegen und dies bei Kalksteinmehl-Suspensionen belegt wurde, besteht - nach Auffassung von ROUSSEL - kein Grund dies bei Beton in Frage zu stellen. Mit Bild 5.5 können - unter der Annahme einer für Normal- und Hochleistungsbeton üblichen Dichte - Fließgrenzen bis ca. 140 Pa bestimmt werden.

Das langsame händische Einfüllen der Betonprobe in die LCPC Box ist ein schlecht reproduzierbarer Vorgang. Für die Messung der dynamischen Fließgrenze ist dies ohne Bedeutung, solange die Fließgrenze der Probe nicht überschritten wird. Aussagen zur Viskosität sind ohne reproduzierbaren Befüll-Vorgang aber nicht möglich, da die Dauer des Fließvorganges über eine vorgegebene Distanz bestimmt werden muss. Um sowohl die Fließgrenze in absoluten Einheiten und die Viskosität als quantitativ empirische Messgröße bestimmen zu können, wurde das LCPC Box-Verfahren in dieser Arbeit modifiziert. Die Befüllung der LCPC Box erfolgt an einem Ende mit dem Auslaufkegel (VdZ-Trichter), dessen Auslauf (Unterkante) sich auf einer Höhe mit der Oberkante der Box befindet (Bild 5.4). Durch einen Aufsatz wurde das Volumen des Auslaufkegels von 5,5 Liter auf 6 Liter erhöht. Da die in dieser Arbeit besprochenen Betone über eine hohe Viskosität verfügen, liegen die tatsächlichen Auslaufzeiten im Bereich der geforderten 30 Sekunden.

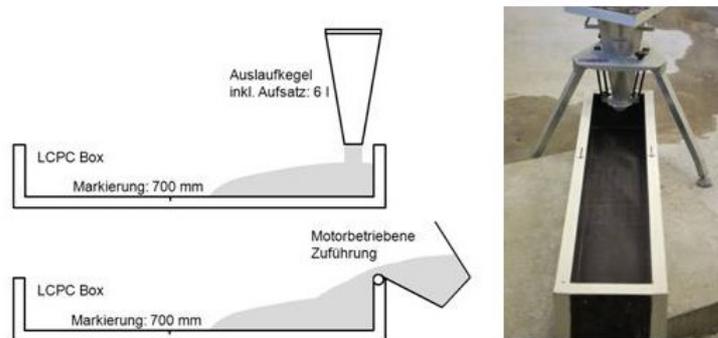


Bild 5.4: LCPC Box mit Auslaufkegel inkl. Aufsatz (Skizze links oben und Bild rechts) und mit einer motorbetriebenen Zuführung (Skizze links unten)

### Versuchsablauf:

- Ausrichten der Box ohne Gefälle (Wasserwaage)
- Befüllung des von innen angefeuchteten Auslaufkegels bis Oberkante Aufsatz
- Befeuchten der LCPC Box von innen mit einem Lappen und anschließendes Entfernen des überschüssigen Wassers mit einem Fensterabzieher. Damit werden bedienerunabhängige, reproduzierbare Ausgangsbedingungen geschaffen.
- Schnelles Ziehen der Verschlussklappe an der Unterseite des Trichters und zeitgleicher Start der Zeitmessung
- Erfassung der Zeit in Sekunden, die das Material benötigt, um die 700mm-Markierung in der Box zu erreichen. Infolge der Wandeffekte ist der Verlauf im Randbereich der Box behindert. Deshalb ist für die Festlegung des Zeitpunktes ein Mittelwert aus dem Maximalwert in der Mitte (Längsachse der Box) und den Randbereichen der Box zu bilden.
- Ablesen des Fließmaßes nach Beendigung des Fließvorgangs. Auch hier ist eine Mittelwertbildung vorzunehmen.
- Ablesen der dynamischen Fließgrenze [Pa] in Diagramm Bild 5.5 unter Berücksichtigung der Dichte des Materials

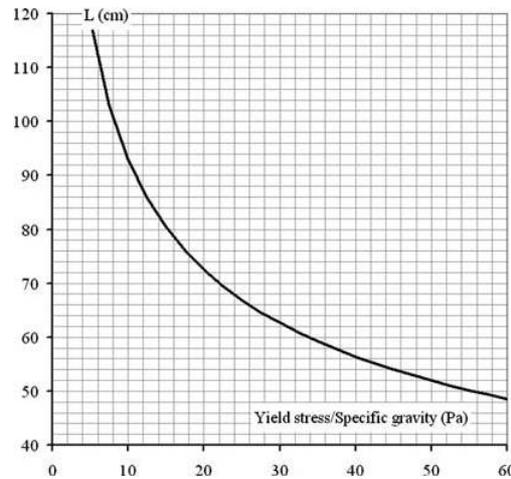


Bild 5.5: Korrelation zwischen dem Fließmaß  $L$  [cm] in der LCPC Box und dem Quotienten aus Fließgrenze und Dichte für untersuchte SVB [7]

## 5.2 Rheometer ICAR RHM-3000

Das Beton-Rheometer RHM-3000 des Herstellers ICAR arbeitet nach der Searl-Methode. Die Motor-Getriebeeinheit verfügt über eine Drehzahlregelung und treibt den Flügel-Drehkörper über einen zwischengeschalteten Drehmoment-Sensor an. Die Versuche können aufgrund dieser Auslegung nur unter Vorgabe der Scherrate, also drehzahlregelt, durchgeführt werden. Der Flügel-Drehkörper besteht aus vier rechtwinkligen Flügelflächen, die um jeweils  $90^\circ$  versetzt auf der Rotationsachse befestigt wurden. Der zylindrische Behälter ist zur Vermeidung von Wandgleiten an der Innenwandung mit vertikal verlaufenden Kunststoffleisten versehen. Um die nötige Homogenität der Probe zu gewährleisten, wurde der Abstand zwischen Messkörper und Wandung größer dem 4-fachen Größtkorn-Durchmesser gewählt.

Zur Bestimmung der statischen Fließgrenze verfügt die Software über einen sogenannten "Stress-Growth-Test". Dazu wird der Messkörper aus dem Stillstand, auf die vorgegebene sehr niedrige Drehzahl (empfohlen 1,5 UPM), beschleunigt. Der hierbei gemessene Maximalwert des Drehmomentes wird zur Berechnung herangezogen.

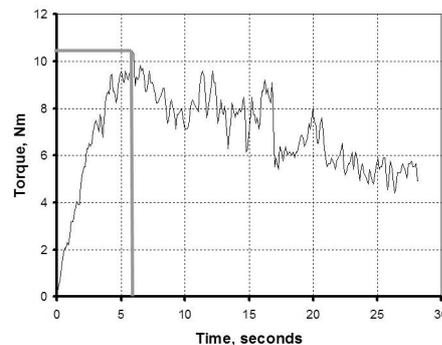


Bild 5.6: Bestimmung der statischen Fließgrenze „Stress Growth Test“ [71]

Zur Bestimmung der Fließkurve müssen die Anfangs- und Endgeschwindigkeit vorgegeben werden, die in einer wählbaren Anzahl von Schritten über eine ebenso wählbare Dauer treppenförmig abgefahren werden. Sollen thixotrope Effekte unterbunden werden, kann die Probe zuvor vorgeschert werden. Für die Auswertung werden die Daten aus der Vorscherphase und die aus der jeweils ersten Sekunde einer Treppenstufe nicht berücksichtigt. Während der einzelnen Messperioden mit verschiedenen konstanten Drehzahlen werden die tatsächliche Drehzahl und das zugehörigen Drehmoment im 100ms-Intervall gemessen. Aus den Messwerten wiederum werden für die einzelnen Geschwindigkeitsstufen einzelne Wertepaare gemittelt und ausgegeben [71].

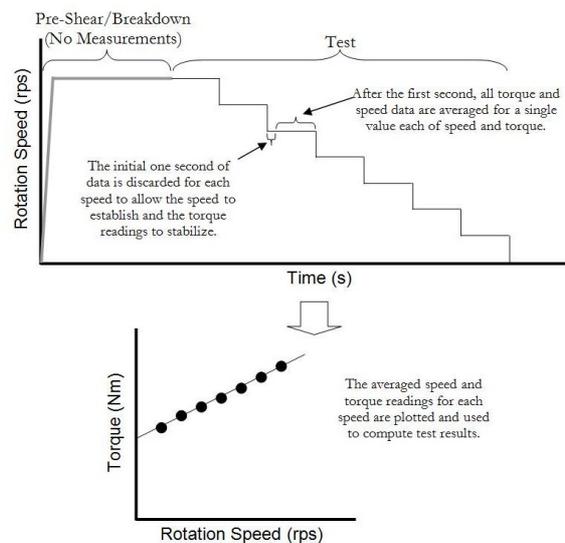


Bild 5.7: Ein Messprofil des Rheometers ICAR (oben) und die damit bestimmten rheometrischen Parameter (unten) [71]

Nach MEZGER [5] ist ein Flügel-Drehkörper in die Kategorie der relativen Messsysteme einzuordnen:

*„Spindeln, Drehkörper oder Rotoren mit Stiften und Flügeln werden eingesetzt, wenn pastenartige Substanzen geprüft werden sollen, die nicht gleichmäßig fließen oder wenn sie große Partikel enthalten. Deshalb gilt für diese Messsystem-Art, dass Scherraten grundsätzlich nicht berechnet werden können. Auch hier sollten die Versuchsergebnisse am besten in Form der Rohdaten angegeben werden, z.B. als Drehzahl  $n$  in  $[\text{min}^{-1}]$  und als relatives Drehmoment  $M_{\text{rel}}$  in  $[\%]$ . Mit Flügel-Drehkörpern besteht bei höheren Drehzahlen die Gefahr, dass derjenige Teil der Messprobe, der sich zwischen den Flügeln befindet, nicht durchgeschert wird, oder das sich ungleichmäßiges „plastisches“ Deformationsverhalten zeigt. In diesem Fall würde eine Probe lediglich in Form eines unverformten Zylinders zwischen den Flügelblättern mitrotiert.“*

KOEHLER [71] nutzt die Rohdaten dennoch, um daraus Absolutwerte nach dem Bingham-Modell zu berechnen. Dabei wird die Annahme getroffen, dass durch die Rotation des Messkörpers ein Materialring zwischen Außenkante Messkörper und Außenkante der Kunststoffleisten geschert wird. Zudem findet eine Scherung der Probe zwischen Unterkante Messkörper und Behälterboden statt, die jedoch von KOEHLER in den Berechnungen vernachlässigt wird.

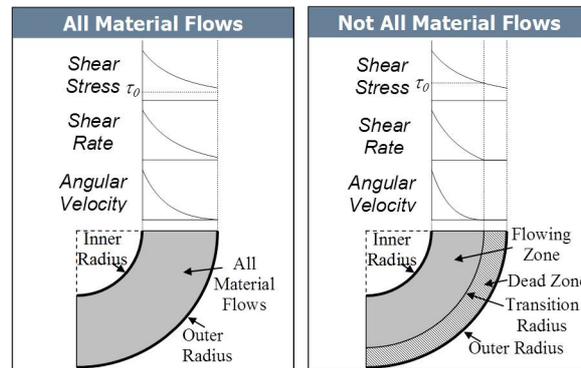


Bild 5.8: Fallunterscheidung, ob das gesamte Material fließt oder nicht [71]

Die Berechnung der Parameter Fließgrenze und plastische Viskosität nach dem Bingham-Modell erfolgt nach REINER-RIWLIN. Die vom Rheometer aufgebrachte Scherspannung nimmt von der Außenkante Messkörper zum Behälterrand hin ab. Daraus ergeben sich die zwei in Bild 5.8 dargestellten und für die weitere Berechnung relevanten Zustände:

1. Die Scherspannung ist bis zum Behälterrand höher als die Fließgrenze der Probe und bewirkt damit das Fließen der Probe im gesamten Scherspalt (Bild 5.8 links). Dabei ist  $\Omega$  die Scherrate in [rad/s],  $T$  das Drehmoment in [Nm],  $h$  die Höhe des Messkörpers,  $R_1$  der Radius des Messkörpers,  $R_2$  der Radius des Behälters,  $\tau_0$  die Fließgrenze in [Pa] und  $\mu$  die plastische Viskosität in [Pa·s]

$$\Omega = \frac{T}{4\pi h\mu} \cdot \left( \frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) - \frac{\tau_0}{\mu} \cdot \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (\text{Gl. 5.1})$$

2. Die Scherspannung liegt in einem Teilbereich des Materialringes unterhalb der Fließgrenze der Probe. Das Material in diesem Teilbereich nimmt somit nicht an der Fließbewegung teil (Bild 5.8 rechts). Um die Gleichung 5.2 zu lösen, wird in der Software des Rheometers eine nicht-lineare Optimierung durchgeführt. Alternativ kann ein in Tabellenkalkulationen integrierter Solver eingesetzt werden.

$$\Omega = \frac{T}{4\pi h\mu} \cdot \left( \frac{1}{R_1^2} - \frac{2\pi h\tau_0}{T} \right) - \frac{\tau_0}{2\mu} \cdot \ln\left(\frac{T}{2\pi h\tau_0 \cdot R_1^2}\right) \quad (\text{Gl. 5.2})$$

Der Radius, der den Übergang vom fließenden zum nicht-fließenden Bereich festlegt, wird nach Gleichung 5.3 berechnet.

$$R_{2, \text{eff}} = \sqrt{\frac{T}{2\pi h\tau_0}} \quad (\text{Gl. 5.3})$$

Die Kalibrierung des Rheometers erfolgte durch den Hersteller an einem Silikonöl mit einer kinematischen Viskosität von 300 Stokes (300 cm<sup>2</sup>/s), welches nicht die Anforderungen des US-amerikanischen National Institute of Standards and Technology (NIST) erfüllt.

### 5.3 Bestimmung des Erstarrungsendes mit BEUS (Beton und Ultraschall)

Der hohe Fließmittelgehalt beeinflusst die Entwicklung der Frühfestigkeit bei Hochleistungsbetonen maßgeblich durch verzögerte Erstarrungsvorgänge. Der Zeitraum bis zum Erreichen dieses Zeitpunktes, an dem sich eine feste Struktur ausbildet, kann bei Leimen nach DIN 196-2 und bei Mörteln nach DIN EN 480-2 durch Vicat-Versuche bestimmt werden. Um den Einfluss der Mischtechnologie, der Mischregime und der verschiedenen Fließmittel-Polymere auf das Erstarrungsverhalten bei Betonen messtechnisch zu erfassen, scheiden Vicat-Versuche aufgrund der Größtkörnung aus. Werden die Betone ohne die grobe Gesteinskörnung hergestellt, ist die Durchführung der Vicat-Versuche möglich. Die Aussagekraft der Ergebnisse ist aber kritisch zu hinterfragen. Die grobe Gesteinskörnung beeinflusst, abhängig von Mischtechnik und Mischregime, durch Mahlreibe-Effekte die Korngrößenverteilung und den Agglomerationsgrad. Als inertes Material dämpft es durch die Wärmespeicherkapazität  $c$  den Temperaturanstieg im Beton während der Hydratation. Im Umkehrschluss ist bei einem Beton ohne grobe Gesteinskörnung infolge erhöhtem Leim-Anteil mit einer verstärkten Hydratationswärme-Entwicklung zu rechnen. Die mit dem Vicat-Versuch bestimmten Werte sind somit verfälscht.

Um eine realistische Festigkeitsentwicklung erfassen zu können, ist folglich die Messung am Beton obligatorisch. Als Verfahren zur Bestimmung der Erstarrungszeit wurde das am WIB entwickelte System BEUS (Beton und Ultraschall) gewählt.

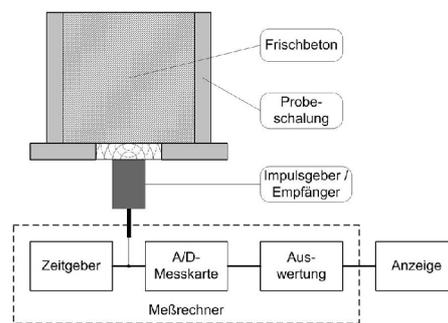


Bild 5.9: Aufbau BEUS (Beton und Ultraschall) [0]

Der Versuchsaufbau ist in Bild 5.9 skizziert. Der als Sender/Empfänger ausgebildete Prüfkopf ist über ein Ultraschallgel an die Bodenplatte angekoppelt und schallt eine Ultraschallwelle ein. Die Ultraschallwelle durchläuft dieses Zwischenmedium aus PMMA (Polymethylmethacrylat) und wird an der Grenzschicht – in Abhängigkeit von den Materialeigenschaften des Betons – unterschiedlich stark reflektiert und vom Empfangsteil des Prüfkopfes aufgenommen. Der Betrag der maximalen Amplitude dieses Rückwandechos wird als Reflexionsfaktor (Gl. 5.4) bezeichnet und kann als Verhältnis der reflektierenden Welle zur ausgesandten Welle dargestellt werden.

$$R(t) = \frac{Z_{\text{Beton}(t)} - Z_{\text{PMMA}(t)}}{Z_{\text{Beton}(t)} + Z_{\text{PMMA}(t)}} \quad Z = \rho V \quad -1 \leq R < 1 \quad (\text{Gl. 5.4})$$

mit dem Reflexionsfaktor  $R$ , der vom Hydratationsgrad abhängigen akustische Impedanz von Beton  $Z_{\text{Beton}}$ , der akustische Impedanz von PMMA  $Z_{\text{PMMA}}$ , der Rohdichte des Materials  $\rho$  und der Schallgeschwindigkeit im Material  $V$

Die Einflüsse durch die Messapparatur und die Ankopplung des Prüfkopfes werden durch eine Messung an der leeren Prüfform bestimmt und durch die Berechnung des Wellenreflexionsfaktors (WRF) normalisiert.

$$WRF(t) = \left| \frac{R_{\text{PMMA/Beton}}(t)}{R_{\text{PMMA/Luft}}(t)} \right| \quad [ - ] \quad 0 \leq WRF \leq 1 \quad (\text{Gl. 5.5})$$

mit:

$R_{\text{PMMA/Beton}}$  = Reflexionsfaktor zwischen Bodenplatte aus PMMA und Beton

$R_{\text{PMMA/Luft}}$  = Reflexionsfaktor zwischen Bodenplatte aus PMMA und Luft

Der zeitliche Verlauf des WRF ist in Bild 5.10 dargestellt. Der Schallausbreitungswiderstand (akustische Impedanz) ist bei einem Beton kurz nach der Herstellung geringer als der der PMMA-Bodenplatte, was zu einem hohen WRF führt.

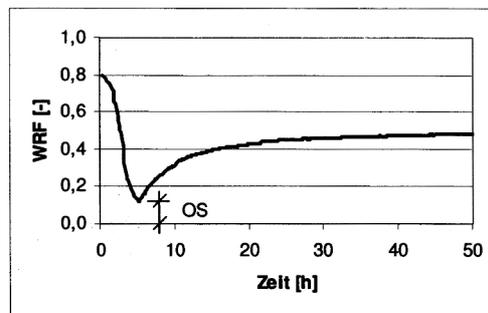


Bild 5.10: Veränderung des WRF im Verlauf der Hydratation [79]

Im Verlauf der Hydratation sinkt der WRF auf ein Minimum bei dem die akustische Impedanz des Betons der des PMMA entspricht. Im weiteren Verlauf steigt der WRF wieder an, da der Schallausbreitungswiderstand des Betons stetig zunimmt. Die Materialauswahl der Bodenplatte bestimmt somit den Zeitpunkt, zu dem das Minimum des WRF gemessen wird. Während Holz infolge zu geringer akustischer Impedanz zu sensibel auf die Hydratationsvorgänge reagiert, erschwert Stahl aufgrund zu hoher Werte für  $R$  das Detektieren des WRF-Minimums.

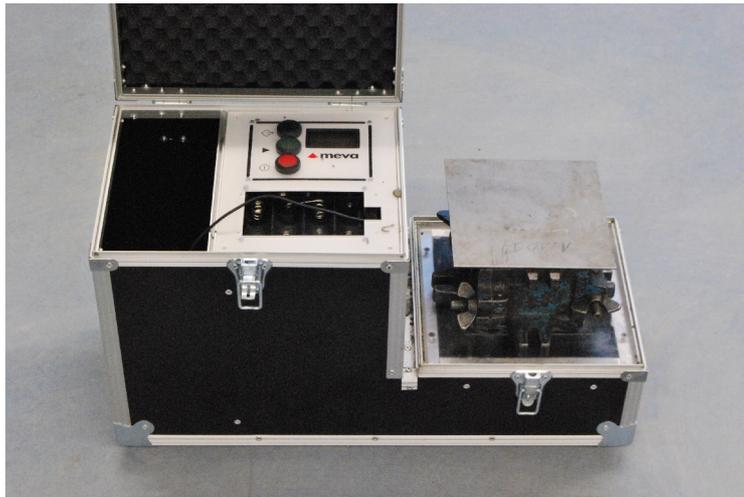


Bild 5.11: Messsystem BEUS mit einer Stahlschalung für Würfel mit einer Kantenlänge von 10 cm

Das im Rahmen eines AiF-Projektes entwickelte System BEUS (Bild 5.11) ermöglicht, auf Basis des beschriebenen Messprinzips, die Bestimmung des Erstarrungsendes an einem Würfel mit der Kantenlänge von 15 cm in einer Kunststoffschalung. Um die Messwerte für die Interpretation der frühen Druckfestigkeiten nutzbar zu machen, wurde die Erstarrungszeit der Betone in Stahlschalungen mit der Kantenlänge von 10 cm gemessen. Das Probevolumen, die Mischcharge, die Stahlschalung und das Normklima entsprachen dem bei der Herstellung der Würfel für die Druckprüfungen.

### 5.4 *BétonLAB Pro*

DE LARRARD et al. [80] haben aufgezeigt, dass die relative Feststoffkonzentration die Dauer bis zur Verflüssigung, also den Übergang vom Kornhaufwerk zur granularen Suspension, maßgeblich bestimmt. Die relative Feststoffkonzentration beschreibt das Verhältnis von aktuellem Feststoffgehalt pro Volumeneinheit zur maximalen Feststoffkonzentration, die unter definierter Verdichtung der Trockenstoffe erreicht wird [80].

Eine Verkürzung der Verflüssigungsphase durch niedrigere relative Feststoffkonzentrationen kann durch verschiedene Maßnahmen erreicht werden. Eine Erhöhung der Wassermenge führt zu einem verringerten aktuellen Feststoffgehalt  $\Phi$  bei gleichbleibender maximaler Feststoffkonzentration  $\Phi^*$ . Ein volumengleicher Austausch einer Teilmenge Zement gegen feinere Partikel (Silika, Feinstflugaschen etc.) führt zu einer höheren maximalen Feststoffkonzentration  $\Phi^*$ , da das zuvor nicht ausgefüllten Zwickelvolumen durch die Austauschstoffe ausgefüllt wird. Dies führt aber zu keiner Änderung des aktuellen Feststoffgehaltes  $\Phi$ . Sowohl durch die Erhöhung der Wassermenge als auch durch die teilweise Zementsubstitution wird die relative Feststoffkonzentration abgesenkt. Unter Wahrung der Dauerhaftigkeits- und Festigkeitsanforderungen von Hochleistungsbetonen kann die Verkürzung der Mischdauer stofflich allerdings nur durch die Steigerung der maximalen Feststoffkonzentration  $\Phi^*$  erreicht werden.

Da dieser Vorgang – insbesondere bei der Vielzahl unterschiedlicher Ausgangsstoffe – nicht trivial ist [81], ist eine Optimierung der Mischungszusammensetzung durch Software, die auf einem Packungsdichte-Modell basiert, zielführend.

BétonLAB Pro wurde am Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) entwickelt und verknüpft verschiedene Modelle so miteinander, dass der Zusammenhang zwischen einer Mischungszusammensetzung und den Betoneigenschaften dargestellt wird. Die Software greift auf eine Datenbank zu, in der die verwendeten Materialien mit ihren Eigenschaften hinterlegt sind.

Die Struktur des Betons wird in einem dreistufigen Verfahren untersucht. Zunächst wird die Packungsdichte der Gesteinskörnung betrachtet, um Informationen über ihre Kompaktheit und Entmischungsneigung zu gewinnen. Die virtuelle Packungsdichte entspricht dem Maximalwert. Sie liegt immer über der realen Kompaktheit, bei der die Körner beliebig angeordnet sind. Zur Berechnung der virtuellen Kompaktheit wird nacheinander jede Fraktion der Gesteinskörnung als dominierend angenommen. Der niedrigste der so berechneten  $n$  Werte entspricht dem der virtuellen Packungsdichte der Gesteinskörnung. Mit Hilfe eines weiteren Parameters, dem Verdichtungsindex, lässt sich die Abweichung der realen von der virtuellen Packungsdichte beschreiben. Der Verdichtungsindex wird vom Verhältnis des vorhandenen Volumens einer Gesteinskörnungsfraktion zum maximal möglichen Volumen dieser Fraktion bei gleichbleibendem Volumen der anderen Fraktionen bestimmt. Nähert sich der Feststoffgehalt einer Mischung der virtuellen Packungsdichte an, geht der Verdichtungsindex gegen Unendlich. Das Festlegen eines Verdichtungsindex führt zu einer eindeutig lösbaren Gleichung mit der realen Packungsdichte als Ergebnis.

Die Packungsdichte des Frischbetons gibt Aufschluss über die erforderliche Energie für eine ausreichende Verdichtung des Betons, sowie über dessen rheologische Eigenschaften. Die Verdichtungswilligkeit wird vom Verdichtungsindex beschrieben. Die Fließgrenze ist die Offenlegung der Reibung der Feststoffpartikel. Kleine Partikel besitzen eine große Oberfläche und verursachen eine hohe Reibung. Die plastische Viskosität dagegen wird von der Bewegung des Wassers im Porensystem der Feststoffpartikel hervorgerufen und ist abhängig vom relativen Feststoffgehalt des Gesamtsystems. Zur Beurteilung der Frischbetonstabilität wird das Verhältnis des Volumens einer Korngrößenfraktion zu dem maximal möglichen Volumen durch das Füllen aller vorhandenen Freiräume zwischen den Partikeln mit dieser Fraktion in einem Diagramm über die Korngrößenfraktionen aufgetragen. In einem gleichförmigen Diagramm spiegelt sich ein stabiler Frischbeton wider, Lücken im Diagramm weisen auf Entmischungsprobleme hin.

Anschließend wird die Packungsdichte der Gesteinskörnung in der erhärteten Zementmatrix betrachtet, um die Widerstandsfähigkeit des Betons zu bewerten. Die Druckfestigkeit wird maßgeblich vom Wasserzementwert beeinflusst. Zusätzlich wird der mittlere Abstand zwischen zwei nebeneinanderliegenden Partikeln betrachtet. Ein kleiner Abstand zwischen den Partikeln führt zu einer hohen Widerstandsfähigkeit des Betons. Der Einfluss auf die Widerstandsfähigkeit aus der Kontaktzone zwischen Gesteinskörnung und Matrix und aus der Druckfestigkeit der Gesteinskörnung wird über die Materialkennwerte der Gesteinskörnung berücksichtigt [80].

Die Berechnung der relativen Feststoffkonzentration ermöglicht es, im Vorfeld sinnvolle Dosierreihenfolgen bei Mischregimen mit mehrstufiger Materialzugabe festzulegen. Nur wenn die relative Feststoffkonzentration von Teilmengen einer Mischung niedriger ist als die der Gesamtmischung, ist eine Verkürzung der Verflüssigungsphase zu erwarten. Diese Erkenntnisse können zur Anpassung des Mischregimes, mit dem Ziel die Mischdauer zu verkürzen und den Energieverbrauch zu senken, genutzt werden.

## 6 Voruntersuchungen und Erstellung des Versuchsprogramms

### 6.1 Referenzbeton: High-Volume Fly Ash Concrete

Die in dieser Arbeit eingesetzte Referenz-Mischung basiert auf dem Konzept von MALHOTRA et. al. [82] und wird im angelsächsischen Sprachraum als **High-Volume Fly Ash Concrete** bezeichnet. Dem Abfall der Frühfestigkeit mit steigendem Anteil an Flugasche [83] wird dabei durch die Verringerung des w/b-Wertes gegengesteuert und zugleich die Dauerhaftigkeit gesteigert. Die positiven Auswirkungen der Flugasche auf die Frischbetoneigenschaften – insbesondere in Verbindung mit Fließmitteln – führen trotz vermindertem Wassergehalt des Betons zu einer verbesserten Verarbeitbarkeit. Das Calciumhydroxid aus der Hydratation des Zementklinkers wird durch den hohen Gehalt an Puzzolanen in einer Sekundärreaktion zu einem hohen Anteil in CSH-Phasen umgesetzt. Die Porosität der Übergangszone Gesteinskörnung/Zementleim (Interfacial Transition Zone) wird dadurch vermindert und neben der Festigkeit die Dauerhaftigkeit gesteigert. Die Verringerung der Alkalität durch die puzzolanische Reaktion des Calciumhydroxides wirkt sich dabei nicht negativ auf den Korrosionsschutz aus. Zum einen ist durch die Reaktion der Eindringwiderstand betonschädlicher Substanzen deutlich erhöht, zum anderen wird gerade das für die elektrolytische Leitfähigkeit und somit für den Korrosionsfortschritt verantwortliche  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  verbraucht. LOCHER [84] verdeutlicht die Bedeutung der Übergangszone, indem darauf hingewiesen wird, dass der mittlere Abstand zwischen Zuschlagkörnern 75  $\mu\text{m}$  bis 100  $\mu\text{m}$  beträgt und die Kontaktzone zwischen Zuschlag und Zementstein 40  $\mu\text{m}$  - 50  $\mu\text{m}$  stark ist. Folglich gehört ein sehr hoher Anteil des Zementsteins zur Kontaktzone. Die Bedeutung der Kontaktzone steigt folglich weiter an, wenn die Packungsdichte erhöht wird und somit der mittlere Abstand zwischen den Zuschlagkörnern weiter sinkt.

		Referenz	Optimiert (BétonLAB Pro)
CEM I 52.5 N HS/NA	kg/m <sup>3</sup>	180	180
Flugasche Baumineral KM/C	kg/m <sup>3</sup>	309	309
FM Sika 20 HE	kg/m <sup>3</sup>	6	4,5
Wasser	kg/m <sup>3</sup>	112	113
Sand 0/2	kg/m <sup>3</sup>	640	577
Gesteinskörnung 2/8	kg/m <sup>3</sup>	746	245
Gesteinskörnung 8/16	kg/m <sup>3</sup>	391	955

Tabelle 6.1: Zusammensetzung des eingesetzten HVFA-Betons (Referenz) und die mit BétonLAB Pro auf die rheologischen Eigenschaften hin optimierte Zusammensetzung (Optimiert)

Nach MALHOTRA [82] ist  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  an weiteren betonschädlichen Reaktionen wie dem Sulfattreiben und der AKR maßgeblich beteiligt und durch den geringen Gehalt in HVFA-Beton folglich geschützt. Auf Basis dieses Konzeptes lassen sich kostengünstige, sehr dauerhafte und sehr gut verarbeitbare Betone mit 28d-Druckfestigkeit bis ca. 60 N/mm<sup>2</sup> und guter Frühfestigkeit herstellen.

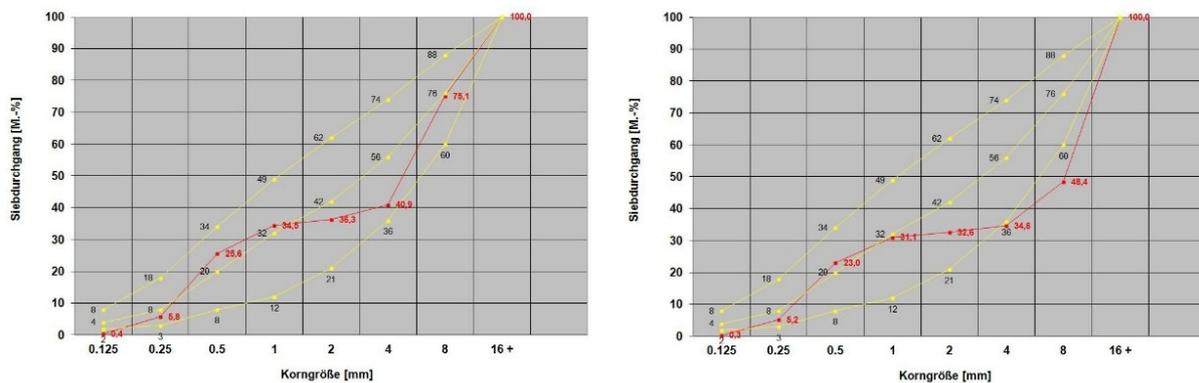


Bild 6.1: Gegenüberstellung der Sieblinie REFERENZ (links) und OPTIMIERT (rechts) der HVFA-Betone und der Regelsieblinien A,B und C

Derartige Betone werden durch die DIN 1045-2 / EN 206-1 nicht erfasst, da der Mindestzementgehalt unterschritten wird und die anrechenbare Menge an Flugasche deutlich oberhalb von 33 Prozent liegt.

Die Referenz-Mischung wurde - aufbauend auf dem HVFA-Konzept - unter Einsatz kostengünstiger Ausgangsstoffe mit der Software auf die rheologischen Eigenschaften hin optimiert. Auf den Einsatz hochpreisiger Zusatzstoffe wie Silika, Metakaolin oder Feinstflugaschen zur Optimierung der Sieblinie wurde demzufolge verzichtet. Aufgrund des hohen Anteils an Puzzolanen erscheint der Einsatz eines Zementes mit hohem wirksamen Alkaligehalt für die puzzolanische Reaktion sinnvoll. Dennoch wurden zwei Zemente mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt eingesetzt. Der niedrige Wasser- und Fließmittelanpruch macht im Zusammenwirken mit geeigneten Hochleistungsfließmitteln eine weitere Absenkung des w/b-Wertes möglich. Daraus resultiert eine hohe Frühfestigkeit und eine deutliche Steigerung der Endfestigkeit auf 90-125 N/mm<sup>2</sup>. Zum Einsatz kommt dabei ein Fließmittel für Fertigteilanwendungen ohne Konsistenzhaltung, das mit der Sättigungsdosierung zugegeben wird. Entgegen der Auslegung des Fließmittels (maximale Verflüssigung bei kurzer Verarbeitbarkeit) bleibt die Verarbeitbarkeit des HVFA-Betons über mehrere Stunden, ohne nennenswerten Abfall der Fließeigenschaften, erhalten. Die Konsistenz des Betons kann über die Fließmittelmenge und das Leimvolumen über mehrere Konsistenzklassen, bis zum SVB, gesteuert werden. Infolge des geringen Wassergehaltes ist ein Bluten nahezu ausgeschlossen.

Eine geringe relative Feststoffkonzentration geht mit einer kurzen Mischzeit einher [80]. Um im Vorfeld erkennen zu können, welche Dosierreihenfolgen sinnvoll sind, wurden Berechnungen mit BétonLAB Pro durchgeführt. Zunächst wurde die in dieser Arbeit eingesetzte Rezeptur für den Grobkorn-HVFA auf die rheologischen Eigenschaften mit BétonLAB Pro optimiert (Tabelle 6.1).

		Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5	Fall 6
CEM I 52.5 N HS/NA	kg/m <sup>3</sup>	180	180	180	180	180	180
Flugasche Baumineral KM/C	kg/m <sup>3</sup>	309	309	309	309	309	-
FM Sika 20 HE	kg/m <sup>3</sup>	4,5	4,5	5	4,5	4,5	4,5
Wasser	kg/m <sup>3</sup>	113	113	113	113	113	113
Sand 0/2	kg/m <sup>3</sup>	577	577	289	-	-	577
Gesteinskörnung 2/8	kg/m <sup>3</sup>	245	-	-	245	-	245
Gesteinskörnung 8/16	kg/m <sup>3</sup>	955	-	-	-	391	-
Stabilisationszeit in [s]		198	156	135	115	167	222

*Tabelle 6.2: Mit BétonLAB Pro berechnete Stabilisationszeiten für die optimierte HVFA-Mischung (Fall 1: einstufiges Mischregime) und für die optimierte HVFA-Mischung ohne einzelne Ausgangsstoffe (Fall 2-6: zweistufige Mischregime)*

Durch die Änderung der Volumenanteile der Ausgangsstoffe konnte somit die minimal mögliche Stabilisationszeit von 198 Sekunden bestimmt werden (Fall 1, Tabelle 6.2). Die Stabilisationszeit ist hierbei als Zeitraum definiert, nach dem sich die rheologischen Eigenschaften durch den Mischvorgang nur noch unwesentlich ändern. Als Mischer wird in [80] ein konventioneller Mischer angenommen.

Ausgehend von dieser in ihrer Packungsdichte optimierten Mischung wurden dann die Stabilisationszeiten für Teilmengen ohne einzelne Ausgangsstoffe berechnet. Insbesondere der Verzicht auf die groben Bestandteile und deren rechnerische Auswirkungen auf die Mischdauer sind für mehrstufige Mischregime relevant.

Wird - wie in Fall 2 - der Beton in einer ersten Stufe ohne die Fraktionen 2/8 und 8/16 hergestellt, sind lediglich 156 Sekunden Mischdauer erforderlich, um die Stabilisationszeit dieser Teilmenge des Betons zu erreichen. Dem so hergestellten Mörtel werden die zwei verbliebenen Fraktionen 2/8 und 8/16 in einem zweiten Schritt zugegeben. Wird die erforderliche Mischgüte in weniger als 198 Sekunden Gesamtmischdauer erreicht, ist dieses zweistufige Mischregime schneller als das einstufige Mischregime im Fall 1. Neben der Verkürzung der Mischdauer ist der Energieverbrauch dann ebenfalls verringert, da im ersten Schritt über 156 Sekunden weniger Mischgut im Mischraum bewegt wurde und dafür weniger Antriebsleistung erforderlich ist. Lediglich im zweiten Schritt ist für einen kurzen Zeitraum das komplette Mischgut im Umlauf.

Erfolgt der Mischvorgang in einem Intensiv-Mischer, kann die Gesamtmischdauer drastisch reduziert werden, da die für eine bestimmte Mischgüte erforderliche Anzahl an Werkzeugumdrehungen infolge erhöhter Werkzeuggeschwindigkeit früher erreicht wird. Zudem geht, die für die Deagglomeration der Feinststoffe von Hochleistungsbetonen relevante Werkzeuggeschwindigkeit, über die Scherrate im Quadrat ein [85]. Der Herstellung des Mörtels im ersten Schritt ist allerdings nicht das von klassischen Mischregimen bekannte „Übermischen“ [54] überlagert. Bei einstufigen Mischregimen bewirkt die grobe Gesteinskörnung bei hohen Werkzeuggeschwindigkeiten neben der gewünschten Auflösung von Agglomeraten auch den verstärkten Partikel-Abrieb. Die zusätzlich geschaffene Oberfläche erhöht den Wasser- und Fließmittelanpruch und führt zu schlechteren Frischbetoneigenschaften. Bei zweistufigen Mischregimen erfolgt die Zugabe der groben Gesteinskörnung erst im zweiten Schritt bei deutlich abgesenkter Werkzeuggeschwindigkeit in einen sehr fließfähigen Mörtel. Die für die Frischbetoneigenschaften förderliche schnelle und gründliche Dispergierung sowie Deagglomeration wird folglich bei zweistufigen Mischregimen ohne die Erhöhung der Oberfläche durch Partikel-Abrieb erreicht.

Auch in den Fällen 3-5 nach Tabelle 6.2 ist die berechnete Stabilisationszeit kürzer als bei dem einstufigen Mischregime (Fall 1). Die zu erwartende erforderliche Mischdauer für die zweite Stufe, in der die verbliebenen

Ausgangsstoffe zugegeben werden, ist für die Fälle 3-5 jedoch länger als für Fall 2. Nach [16] nimmt die erforderliche Mischdauer für die distributive Verteilung von Partikel mit deren Durchmesser ab. In dem zweistufigen Mischregime nach Fall 2 muss lediglich die Gesteinskörnung größer 2 mm verteilt werden, die zudem nicht agglomeriert vorliegt. Für die weiteren Untersuchungen wurden deshalb das einstufige Mischregime (Fall 1) und das zweistufige Mischregime gemäß Fall 2 betrachtet.

Für Fall 6 nach Tabelle 6.2 liegt die berechnete Stabilisationszeit für den ersten Schritt sogar über der des einstufigen Verfahrens. Da in Fall 6 die Flugasche erst im zweiten Schritt zugegeben wird, sinkt die maximale Feststoffkonzentration  $\Phi^*$  im ersten Schritt. Die relative Feststoffkonzentration (Kapitel 5.4) steigt und damit auch die erforderliche Stabilisationszeit.

### 6.2 Bestimmung rheologischer Parameter im Mischer KKM-R 30

#### 6.2.1 Vergleichende Messungen zwischen KKM-R 30 und dem Rheometer

Zunächst wurde durch vergleichende Messungen zwischen dem ICAR Rheometer und dem KKM-R 30 nachgewiesen, dass die in dieser Arbeit gewählte Konfiguration des KKM-R 30 in der Lage ist, die Rohdaten mit der erforderlichen Präzision zu messen. Die Messungen wurden mit dem **ICAR Flügeldrehkörper** in nahezu identischen Behältern mit Betonen aus einem Mischansatz von 60 l durchgeführt. Die Herstellung erfolgte in einem Elba Einwellen-Mischer EMS 60 C

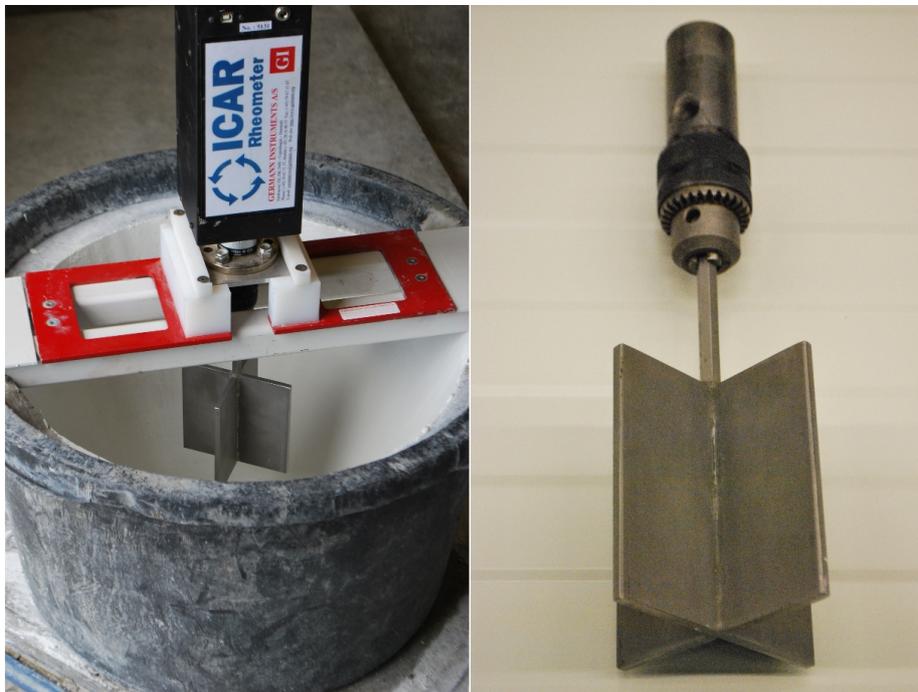


Bild 6.2: Rheometer ICAR RHM-3000 im Betonkonus mit den Abmessungen des KKM-R 30 (links) und Adapter für den ICAR Flügeldrehkörper zur Befestigung an der Aufnahme für das innere Mischwerkzeug des KKM-R 30

Für die Messungen im Konus-Mischer war ein Adapter zur Aufnahme des ICAR Flügeldrehkörpers an der Verschraubung des inneren Mischwerkzeugs erforderlich (Bild 6.2 rechts). Um die Verhältnisse im KKM-R 30 bei Messungen mit dem Rheometer nachstellen zu können, wurde ein Abdruck vom Konus des KKM-R 30 genommen und ein Positivabdruck aus Beton erstellt. Zur Gewährleistung vergleichbarer Oberflächenbeschaffenheiten wurden die Innenflächen des Betonkonus mit dem Originallack des Konus-Mischers beschichtet. Der Betonkonus mit der Aufnahme für das Rheometer ist in Bild 6.2 links dargestellt.

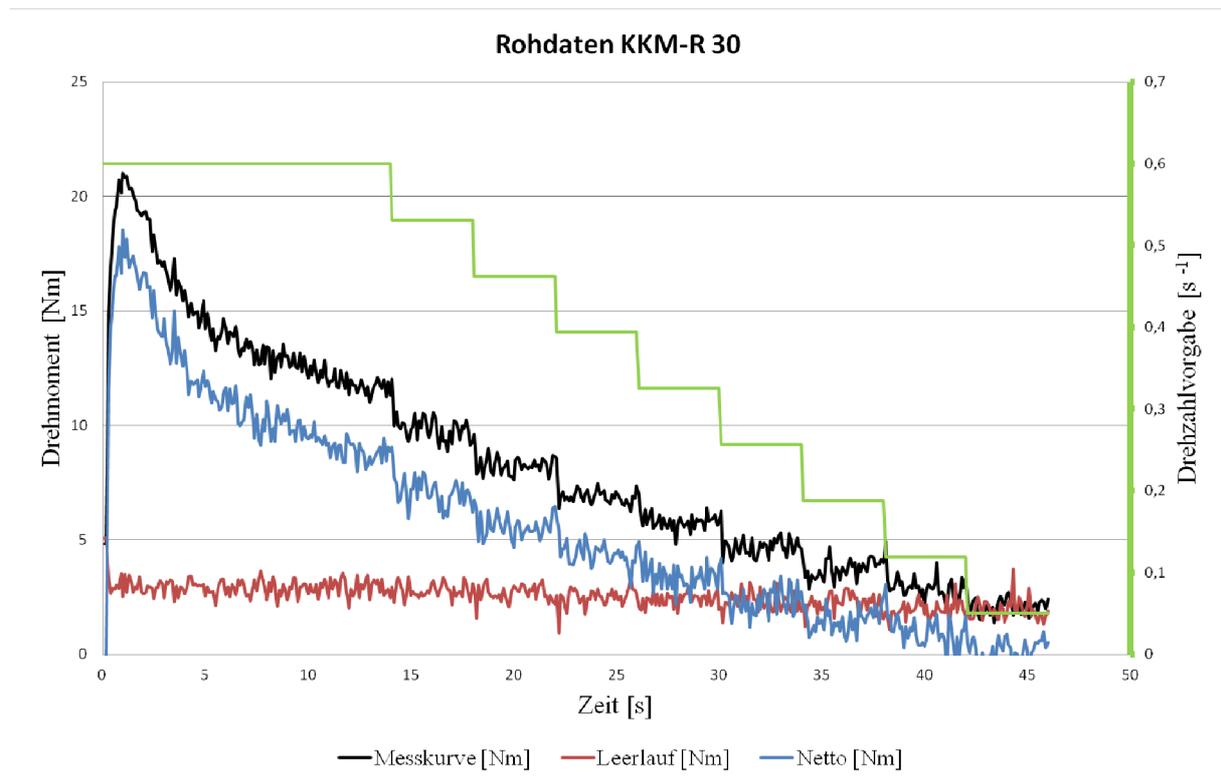


Bild 6.3: Drehmoment-Verlauf des ICAR Flügeldrehkörpers im KKM-R 30 bei mehreren konstanten Drehzahlen. MESSKURVE für einen HVFA-Beton der Konsistenzklasse SF3/VS2, LEERLAUF im Leerlauf und NETTO als Differenz

In Bild 6.3 ist das Leerlauf-Drehmoment des dreifach gelagerten Antriebsstranges für das innere Mischwerkzeugs bei verschiedenen Drehzahlen dargestellt. Das Messregime entspricht dem des ICAR Rheometers und wird in Kapitel 6.2.2 näher beschrieben. Um das während der Messung am Beton tatsächlich benötigte Drehmoment zu erhalten, müssen die Messwerte um die Leerlaufverluste vermindert werden. Wie in Bild 6.6 dargestellt, kann der Drehmomentverlauf sowohl ohne Belastung (LEERLAUF), als auch nach dem Mischvorgang erfasst werden. Die unter Belastung erfassten Messwerte werden um die im Leerlauf erfassten Messwerte vermindert und als Netto-Werte auf dem Touch-Panel dargestellt.

Die Messwerte des Rheometers und des KKM-R 30 für einen HVFA-Beton der Konsistenzklasse SF3/VS2 sind in Bild 6.4 dargestellt und belegen die sehr gute Übereinstimmung. Die gewählte Konfiguration des KKM-R 30 verfügt folglich über eine Präzision auf dem Niveau des Rheometers ICAR RHM-3000.

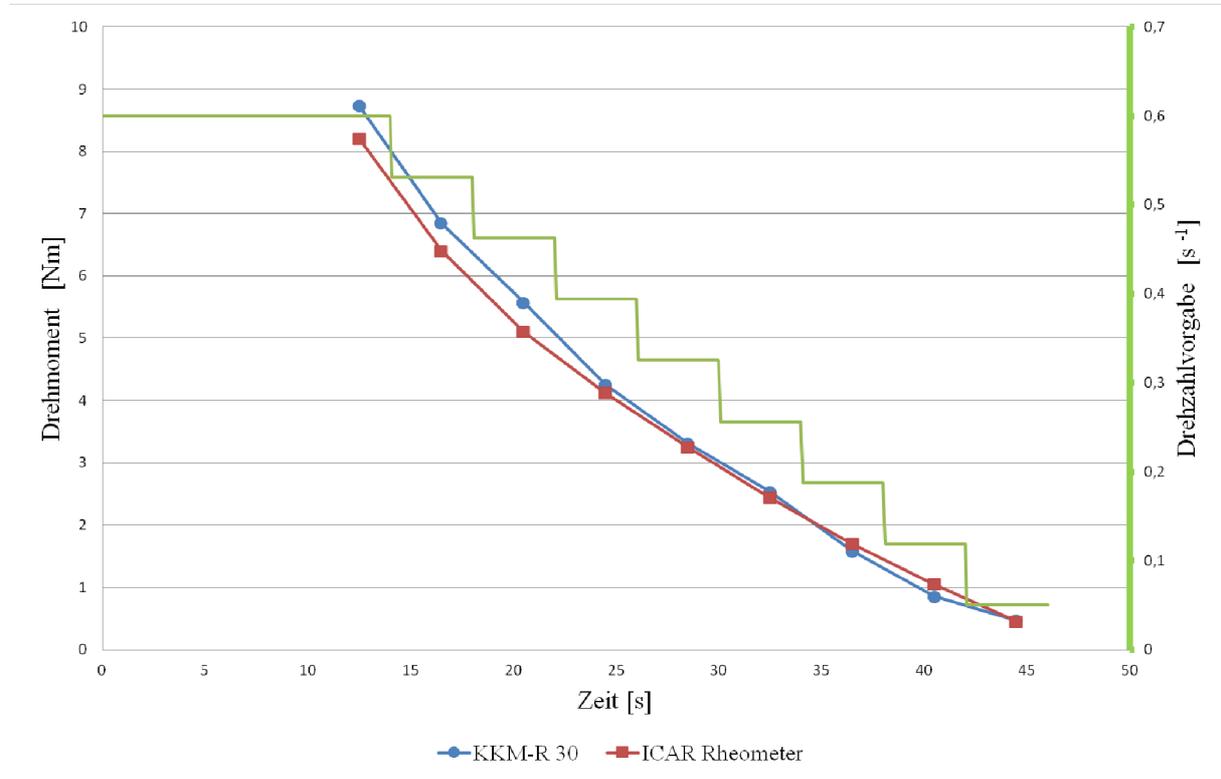


Bild 6.4: Gegenüberstellung der Rohdaten des ICAR Rheometers und den NETTO-Messwerten des KKM-R 30 mit dem ICAR Flügeldrehkörper für einen HVFA-Beton der Konsistenzklasse SF3/VS2

Die Auswirkungen von veränderten Scherbelastungen auf die Bestimmung rheologischer Parameter zeigt Bild 6.5. Die Messungen erfolgten im KKM-R 30 mit dem ICAR Flügeldrehkörper bei 36 UPM (bzw.  $0.6 \text{ s}^{-1}$ ), beim ICAR-Rheometer im Betonkonus hingegen nur mit 30 UPM (bzw.  $0.5 \text{ s}^{-1}$ ). Die Vorscherphase von 10 Sekunden mit der geringeren Drehzahl von  $0,5 \text{ s}^{-1}$  reichte nicht aus, um die thixotropen Eigenschaften des Frischbetons im selben Umfang zu reduzieren wie bei  $0,6 \text{ s}^{-1}$ . Für die Aufrechterhaltung des vorgegebenen Drehzahlprofils waren deshalb während der Messung der Fließkurve höhere Drehmomente durch das Rheometer aufzubringen.

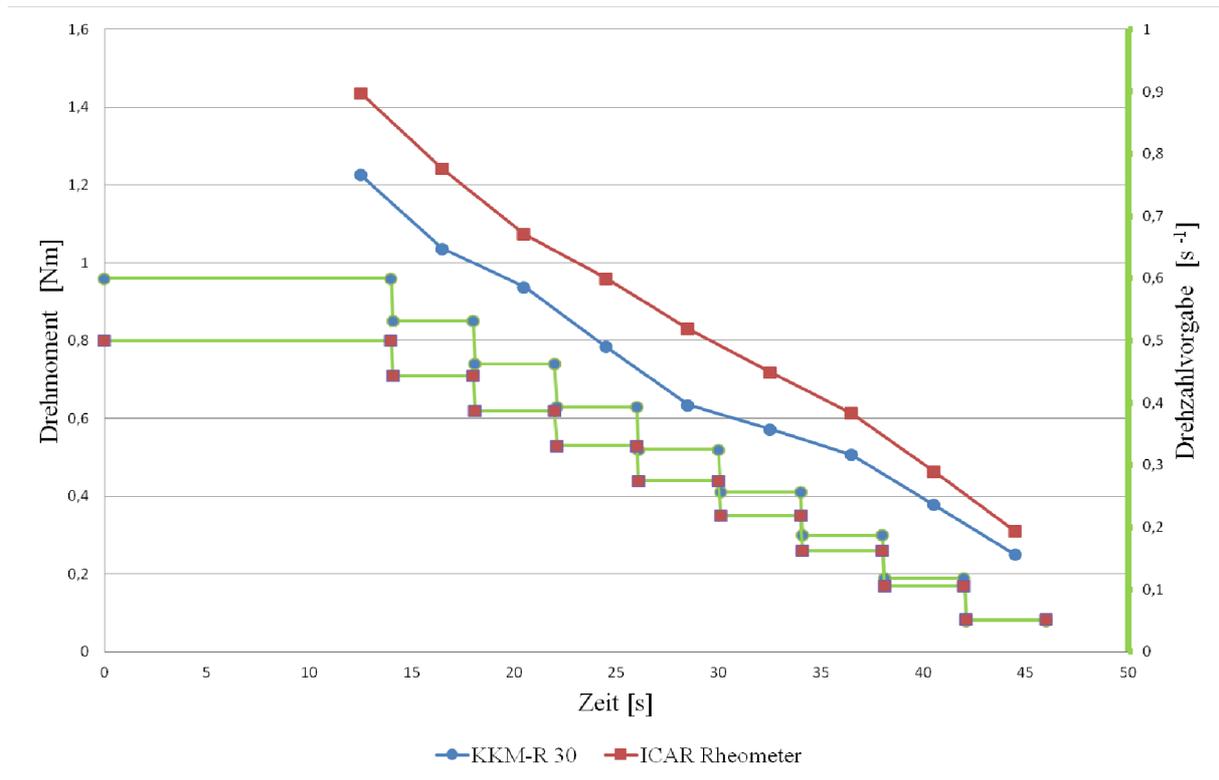


Bild 6.5: Einfluss des Messregimes auf die Fließkurve: KKM-R 30 mit maximal 36 UPM und ICAR mit maximal 30 UPM

Bei absoluten Messwerkzeugen ist die Messgeometrie definiert und ermöglicht die Berechnung des sogenannten Schubfaktors A und des Scherfaktors M. Die Viskosität ergibt sich somit nach [38]:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{\text{Schubspannung}}{\text{Schergeschwindigkeit}} = \frac{\text{Drehmoment } M_d \cdot \text{Schubfaktor } A}{\text{Drehzahl } \Omega \cdot \text{Scherfaktor } M} \quad (\text{Gl. 6.1})$$

Bei Einsatz des Mischwerkzeugs können die Geometrien zur Berechnung der Schubspannung (Schubfaktor A) und der Schergeschwindigkeit (Scherfaktor M) nicht berechnet werden. Dem Schub- und dem Scherfaktor wird der Wert 1 zugewiesen, um die Berechnung der Parameter in relativen Einheiten zu ermöglichen.

Zur Erfassung der relativen Parameter im Mischer wurden die nachfolgenden Wege besritten:

### 6.2.2 Bestimmung der Fließkurve

Das Messregime des KKM-R 30 wurde vom ICAR Rheometer übernommen. Zunächst gibt der Benutzer über das Touchpanel (Bild 6.6) die Maximal-Drehzahl ( $UPM_{max}$ ) vor. Durch die in der SPS hinterlegte Minimal-Drehzahl von 1,732 UPM (bzw.  $0.029 \text{ s}^{-1}$ ) ist der Drehzahlbereich während des Messvorgangs festgelegt. Über das Touch-Panel kann der Benutzer vor der eigentlichen Messung der Fließkurve eine Kalibrierung durchführen.



Bild 6.6: Menü-Unterpunkt RHEOLOGIE: Eingabe der Maximaldrehzahl [UPM] für die Fließkurven, der Frequenz [Hz] für den Amplituden-Test, den Speicherplätzen auf der SD-Speicherkarte sowie Start-Buttons für die genannten Versuche

Der Programmablauf und das Messregime sind bei der Messung der Fließkurve und bei der Kalibrierung der Fließkurve identisch. Allerdings erfolgt die Kalibrierung im Leerlauf ohne Mischgut. Die bei der Messung der Fließkurve bestimmten Messwerte werden um die Leerlaufverluste vermindert, um das für die Aufrechterhaltung der Drehzahl erforderliche Drehmoment ohne Maschinenverluste zu bestimmen. Das so bestimmte Drehmoment ist abhängig von der strukturphysikalischen Charakteristik des Frischbetons und dient der Berechnung der Parameter in relativen Einheiten.

Das Messregime und die Auswertung werden nachfolgend erläutert:

Das Mischgut wird mit der vom Benutzer vorgegebenen Rotationsgeschwindigkeit *UPM max.* für 10 Sekunden vorgeschert, um thixotrope Effekte zu eliminieren. Nachfolgend wird die Rotationsgeschwindigkeit in 9 Stufen mit gleicher Stufenweite reduziert (Beispiel Tabelle 6.3)

Stufe	Dauer [s]	ICAR [UPM]	KNIELE KKM-R 30 [UPM]
0	10	36	20,782
1	4	36	20,782
2	4	31,875	18,401
3	4	27,75	16,019
4	4	23,625	13,638
5	4	19,5	11,257
6	4	15,375	8,876
7	4	11,25	6,494
8	4	7,125	4,113
9	4	3	1,732

Tabelle 6.3: Anpassung der Drehzahlen des KKM-R 30 über die Werkzeuggeschwindigkeiten

Bild 6.7 sind die Drehzahlvorgaben sowie die tatsächlich gemessenen Drehzahlen und Drehmomente während einer Messung der Fließkurve zu entnehmen.

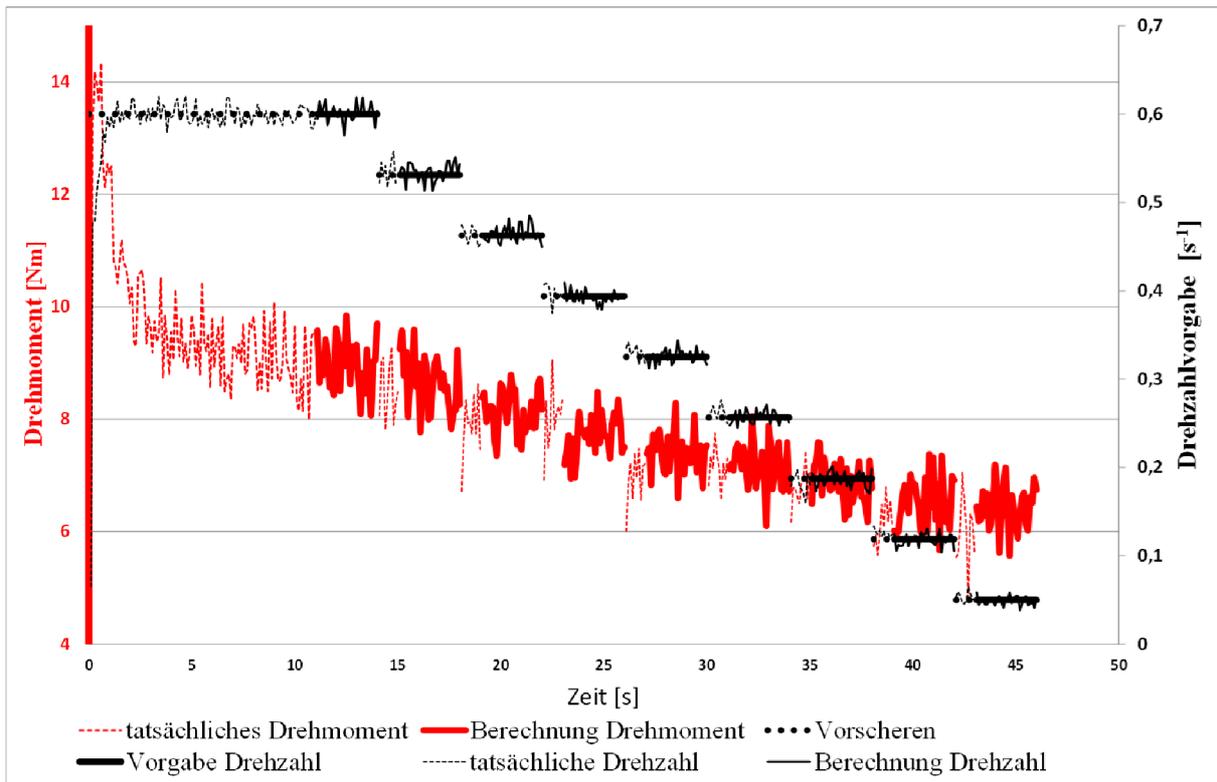


Bild 6.7: Durch die SPS vorgegebenes Drehzahlprofil für den PMSM und die tatsächlichen Messwerte für Drehzahl und Drehmoment während der Bestimmung einer Fließkurve im KKM-R 30

Die SPS gibt die Soll-Drehzahl gemäß Tabelle 6.3 vor, erfasst die Messwerte Geberdrehzahl, berechnete Drehzahl und Drehmoment über die Profibus-Verbindung mit einer Taktfrequenz von 10 Hz und speichert die Werte auf einer SD-Karte. In den ersten Sekunden nach Messbeginn und unmittelbar nach Änderung der Drehzahl liegen noch keine stationären Bedingungen vor. Die ersten 10 Sekunden (Stufe 0) und die jeweils erste Sekunde jeder folgenden Stufe werden deshalb nicht für die weiteren Berechnungen berücksichtigt. Nur die mit *Berechnung Drehmoment* und *Berechnung Drehzahl* in Bild 6.7 ausgewiesenen Messwerte werden zur Berechnung der arithmetischen Mittelwerte für die tatsächliche Drehzahl und das Drehmoment in jeder Drehzahlstufe herangezogen und über das Touch-Panel als 9 Wertepaare ausgegeben (Bild 6.8). Die Berechnung der rheologischen Parameter dynamische Fließgrenze  $g_{\text{KKM-R } 30}$  in [Nm] und plastische Viskosität  $h_{\text{KKM-R } 30}$  in [Nm/min] erfolgt durch die SPS nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate.

Um die Scherbedingungen des Mischwerkzeugs an das ICAR Rheometer anzupassen, wurden die Rotationsgeschwindigkeiten an die veränderten Abmessungen angepasst. Hierbei wird die Außenkante der Mischpaddel, die zugleich die Außenkante der Stifte ist, zur Berechnung herangezogen.

$$\text{Werkzeuggeschwindigkeit} \left[ \frac{m}{s} \right] = \frac{2 \cdot \pi \cdot \text{Radius} [m] \cdot \text{Drehzahl} [UPM]}{60 [s]} \quad (\text{Gl. 6.2})$$

Der Messkörper des ICAR Rheometers hat einen Radius von 6,35 cm und legt bei 36 UPM eine Strecke von 0,3989 m/s zurück. Mit dem Radius des Mischpaddel von 11 cm ergeben sich die angepassten Drehzahlen für den KKM-R 30 gemäß Tabelle 6.3.

	VERSUCH	LEERLAUF	NETTO
1,73 UPM	0.00	0.00	0.00
4,11 UPM	0.00	0.00	0.00
6,50 UPM	0.00	0.00	0.00
8,88 UPM	0.00	0.00	0.00
11,3 UPM	0.00	0.00	0.00
13,6 UPM	0.00	0.00	0.00
16,0 UPM	0.00	0.00	0.00
18,4 UPM	0.00	0.00	0.00
20,8 UPM	0.00	0.00	0.00
g	0.00	0.00	0.00
h (x x)	0.0000	0.0000	0.0000
FG stat.	0.00	0.00	0.00

Bild 6.8: Menü-Unterpunkt ERGEBNISSE: Ausgabe der berechneten Wertepaare der Fließkurve, der (statischen) Fließgrenze, und der rheologischen Parameter  $g$  und  $h$ ; Netto-Werte als Differenz aus VERSUCH und LEERLAUF

Die Berechnung der Fließgrenze über ein rheologisches Modell wird in [5] kritisch bewertet. Dabei wird aus den einzelnen Messwerten eine Modellfunktion z. B. nach Bingham, Herschel-Bulkley oder Casson berechnet und die Fließgrenze als Schnittpunkt mit der Schubspannungs-Achse bestimmt. Da die Berechnungsgrundlagen der einzelnen Modelle stark voneinander abweichen, variieren auch die Fließgrenzen erheblich [39]. MEZGER [5] fasst zusammen:

„Da eine solche Fließgrenze nicht gemessen, sondern lediglich näherungsweise berechnet wird, sollte diese Methode nur für einfache QS-Tests verwendet werden, aber nicht für zeitgemäße Forschung und Entwicklung.“

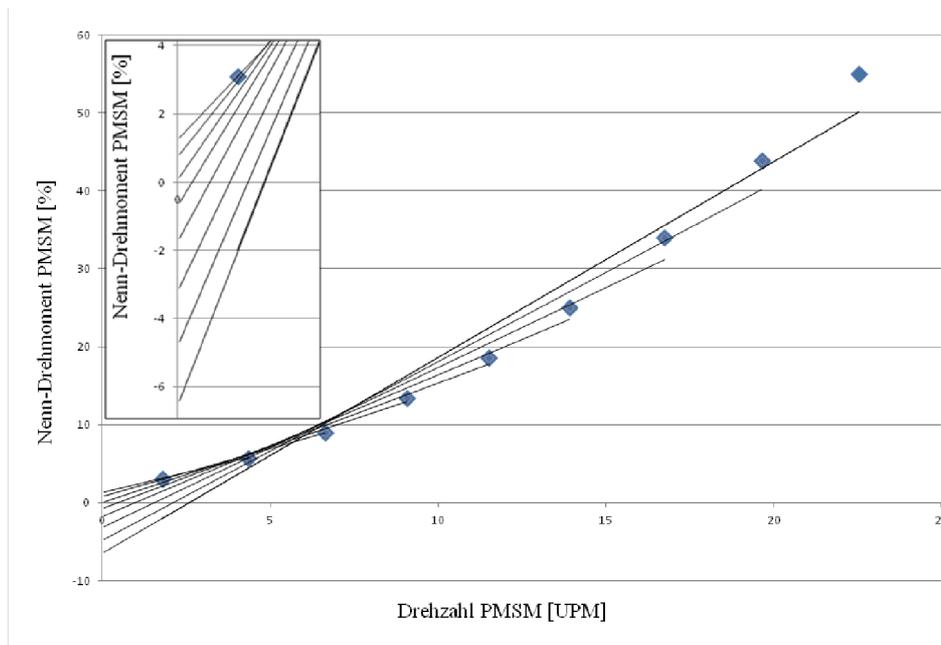


Bild 6.9: Regressionsgeraden für 2 bis 9 Wertepaare der Fließkurve und die daraus extrapolierten Fließgrenzen für den Mischversuch MV 20 ohne Abzug der Leerlaufverluste

Der überproportionale Drehmoment-Anstieg der Fließkurve des Mischversuchs MV 20 ist in Bild 6.9 dargestellt. Die Extrapolation der Regressionsgeraden über alle 9 Wertepaare führt zu einer negativen Fließgrenze, die physikalisch nicht möglich ist. Werden für die Regression lediglich die Wertepaare aus dem unteren Geschwindigkeitsbereich berücksichtigt, nimmt die extrapolierte Fließgrenze positive Werte an. Der Wertebereich der Fließgrenze reicht von - 6,48 Nm bis + 1,27 Nm (Bild 6.9) und belegt die Nichteignung der Fließkurve zur Bestimmung der Fließgrenze. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird in Kapitel 6.2.3 eine Alternative vorgestellt, bei der die Fließgrenze nicht indirekt über ein rheologisches Modell berechnet, sondern direkt als Messwert ermittelt wird.

### 6.2.3 Bestimmung der dynamischen und der statischen Fließgrenze

Das in der vorliegenden Arbeit verwendete Beton-Rheometer ICAR RHM-3000 arbeitet drehzahl geregelt und bestimmt die Fließgrenze deshalb nach der sogenannten CSD-Methode. Dabei wird der Flügel-Drehkörper aus dem Stillstand auf eine sehr geringe, konstante Drehzahl (Vorgabe: 0,025 UPM) beschleunigt und der Messvorgang durch den Benutzer manuell abgebrochen. Das während der Messung erfasste maximale Drehmoment wird zur Berechnung der statischen Fließgrenze genutzt.

Die Bestimmung der Fließgrenze mit dem Konus-Mischer erfolgt abweichend mit der in [86] empfohlenen CSS-Methode zur genauen Bestimmung kleiner Fließgrenzen. Dabei wird die Schubspannung linear gesteigert und die Deformation der Probe gemessen.

Mit der direkten Drehmoment-Regelung der Frequenzumrichter (DTC) wird das Drehmoment des Permanent-Magnet-Synchronmotors (PMSM) - ausgehend von 0,5 Prozent des Nennmomentes - linear mit 0,84 N/s gesteigert. Der auf der Motorwelle befestigte Hiperface-Drehgeber löst eine Umdrehung der Motorwelle mit 16 Bit auf und liefert somit 32768 Einzelschritte mit 0,192 mrad für jede Drehrichtung. Die Umsetzung in CoDeSys ist in Bild 6.10 dargestellt und wird nachfolgend erläutert.

Der boolesche Ausgang **.OUT** des Funktionsblocks **Puls** (Schritt 0) vom Typ **BLINK** ändert im 25ms-Takt den Zustand (TRUE/FALSE). Die mit einer **EN/ENO**-Bedingung versehenen Operatoren **ADD** (Schritte 1 und 3) und **MOVE** (Schritte 5,7 und 13), und der Funktionsblock **STATISTIC\_INT** (Schritt 10) werden erst dann einmalig ausgeführt, wenn der Zustand des Ausgangs **Puls.OUT** von FALSE auf TRUE wechselt. Damit werden **ADD**, **MOVE** und **STATISTIC\_INT** im 50 ms-Takt einmalig ausgeführt. Mit dem Operator **ADD** (Schritt 1) wird das Drehmoment des PMSM mit dem Profibus-Parameter **Drehmoment\_Soll\_PMSM** um drei Einheiten (3/10000 des Nenndrehmoments von 140 Nm) erhöht und über die Profibus-Verbindung dem Umrichter zyklisch übermittelt. Der Operator **ADD** (Schritt 2) erhöht die Variable **Schritzaehler\_FGrenzen**, die zur Speicherung der Antriebsdaten in einem Daten-Array benötigt wird. Die Operatoren **MOVE** (Schritte 5 und 7) kopieren die aktuelle Drehzahl des Hiperface-Gebers und das aktuelle Drehmoment des PMSM in das Daten-Array **Speichern\_FGrenzen\_Drehzahl** bzw. **Speichern\_FGrenzen\_Drehmoment**. Mit dem Funktionsblock **Maximum** vom Typ **STATISTICS\_INT** wird das maximale Drehmoment während der Messung bestimmt und in der Variable **FG\_statisch** gespeichert.

Im weiteren Programmablauf, der in Bild 6.10 nicht dargestellt ist, wird nach Überschreitung einer festgelegten Maximaldrehzahl des Hiperface-Drehgebers der Messvorgang beendet. Nach der Speicherung der Messdaten auf der SD-Speicherkarte wird die Fließgrenze in [Nm], wie nachfolgend beschrieben, bestimmt.

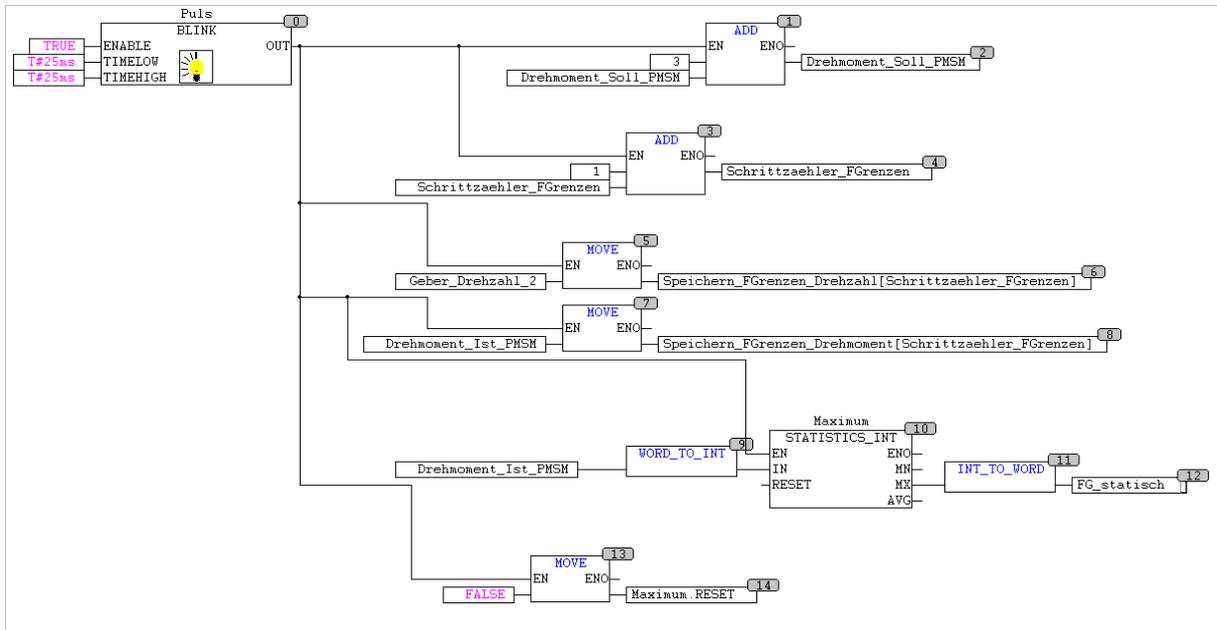


Bild 6.10: Ausschnitt aus der CoDeSys-Programmierung in der Programmiersprache CFC zur Bestimmung der dynamischen und der statischen Fließgrenze mit der SPS des KKM-R 30

In Bild 6.11 sind die Drehgeber-Geschwindigkeit in [mrad/s] und das vom Frequenzumrichter berechnete aufgebraachte Drehmoment des inneren Antriebs in [Nm] ablesbar. Im Bereich von 14 Nm -15 Nm steigt die Geschwindigkeit des Drehgebers überproportional an. Um das Drehmoment zu bestimmen, bei dem der linear elastische Bereich verlassen wird, werden die Messwerte in zwei Messwertreihen unterteilt, die Regressionsgeraden und der Schnittpunkt der Regressionsgeraden bestimmt. Der Schnittpunkt der beiden Geraden legt die Fließgrenze fest, oberhalb derer irreversible Deformationen stattfinden (viskoelastisches oder viskoses Fließen).

Die so bestimmte Fließgrenze muss abschließend um die Maschinenverluste vermindert werden. Im Leerlauf (ohne Mischgut im Mischbehälter) beginnt die Motorwelle oberhalb von  $1,15 \text{ Nm} \pm 0,05 \text{ Nm}$  zu rotieren.

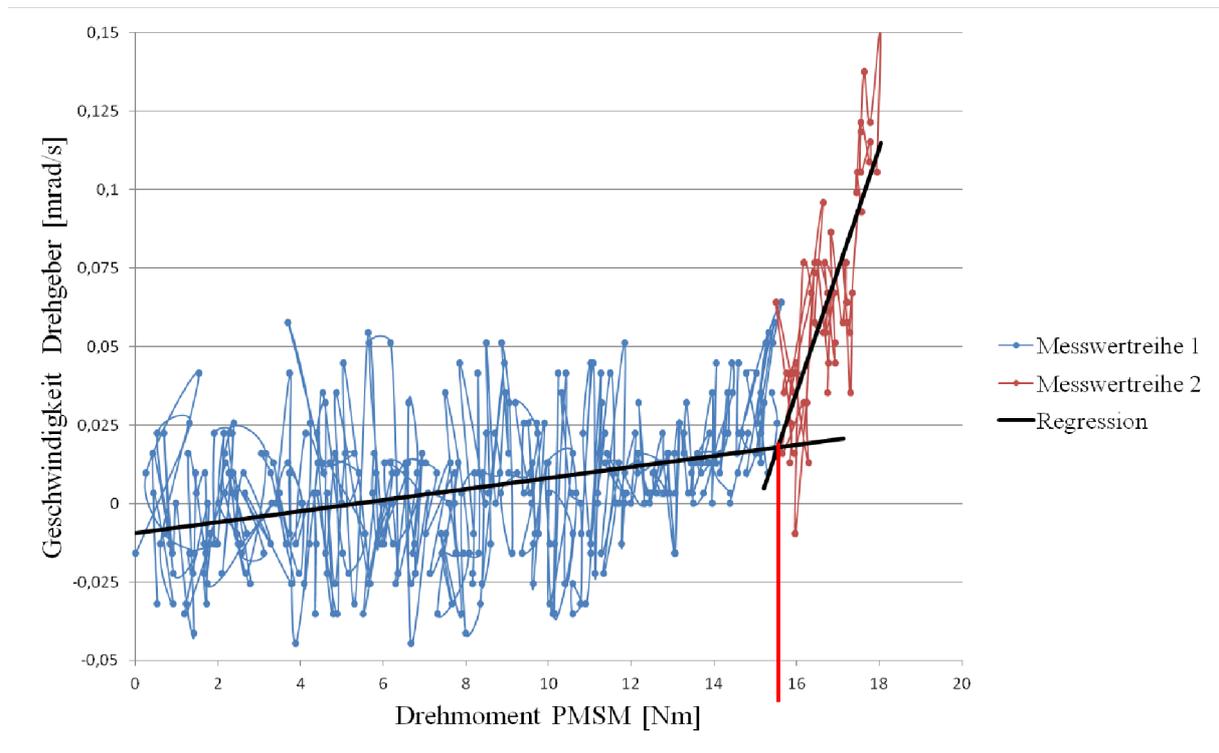


Bild 6.11: Geschwindigkeit des Drehgebers [mrad/s] über das linear ansteigende Drehmoment des inneren Antriebs (PMSM)

### 6.2.4 Bestimmung der Hysterese-Fläche

Für die Bewertung der thixotropen Eigenschaften wird die sogenannte Hysterese-Fläche zwischen dem aufsteigenden und dem absteigenden Ast der Fließkurve bestimmt. Die Erfassung der dafür erforderlichen Messwerte erfolgt analog zur Bestimmung der Fließkurve (Kapitel 6.2.2). Durch Aktivierung des Schaltfeldes "Thixotropie" auf dem Touch-Panel (Bild 6.6) wird der Drehzahlbereich von 1,732 UPM bis UPM max. (Bild 6.8) in fünf Drehzahlen mit gleichem Abstand unterteilt. Das Messregime besteht aus fünf konstanten Drehzahlen, die in einer Aufwärtsrampe für jeweils vier Sekunden aufrecht erhalten werden. Abweichend erfolgt der Betrieb des Motors bei höchster Drehzahl für 10 Sekunden, bevor die Abwärtsrampe mit den vorgegebenen Drehzahlen in umgekehrter Reihenfolge abefahren wird (Bild 6.12).

MEZGER [5] gibt jedoch zu bedenken, dass das Fließverhalten mit dieser Methode lediglich im Bewegungszustand, also nur während des Strukturabbaus, erfasst wird. Über das Verhalten im Ruhezustand kann folglich keine Aussage getroffen werden. Empfohlen wird stattdessen der Sprungversuch nach Kapitel 6.3.2.

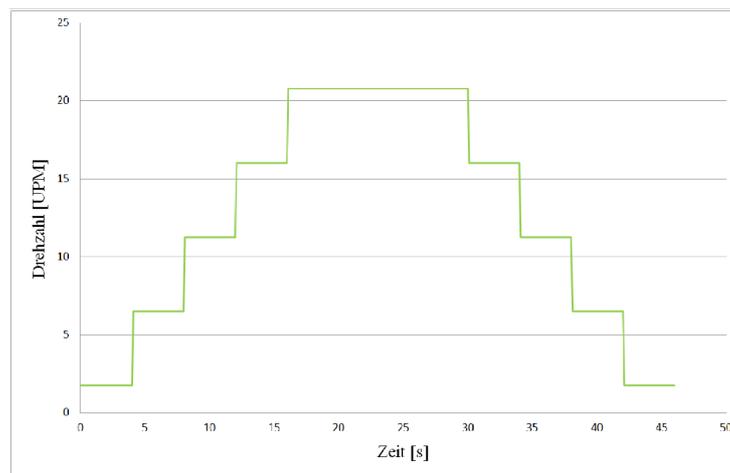


Bild 6.12: Drehzahl-Messregime mit fünf konstanten Drehzahlen für die Bestimmung der Hysterese-Fläche im KKM-R30

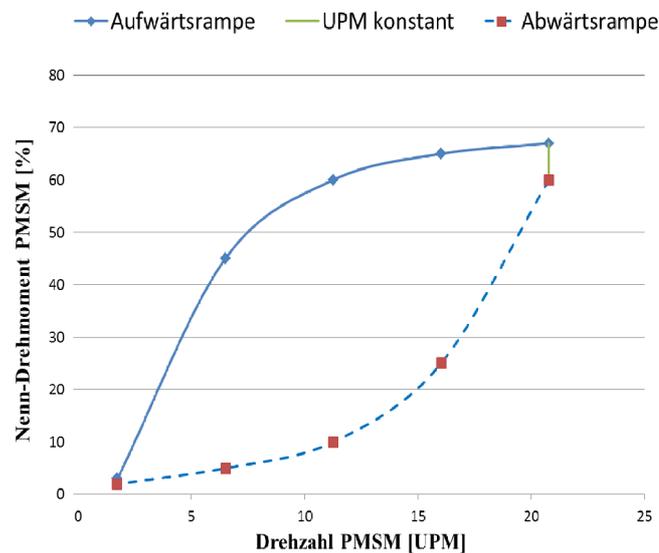


Bild 6.13: Bestimmung der Hysterese-Fläche für einen HVFA-Beton im KKM-R30 durch 10 Wertepaare Drehzahl [UPM]/Drehmoment [Nennmoment PMSM in %]. Drehzahl-Messregime mit fünf konstanten Geschwindigkeiten

### 6.3 Oszillations-Versuche

Der Direktantrieb des KKM-R 30 mit seiner hohen Steifigkeit und geringen Masse ermöglicht - im Gegensatz zu klassischen Mischerantrieben - hochdynamische Anwendungen wie Oszillations-Versuche.

#### 6.3.1 Amplituden-Test

Die Auslenkung POS des Drehgebers wird im Amplituden-Test (Kapitel 2.2.1) durch ein Drehmoment bewirkt das sinusförmig verläuft und dessen Amplitude kontinuierlich ansteigt. Die Amplitude wird dabei auf der positiven Hälfte der Sinuskurve von der Basislinie bis zum Maximum der Kurve gemessen [5].

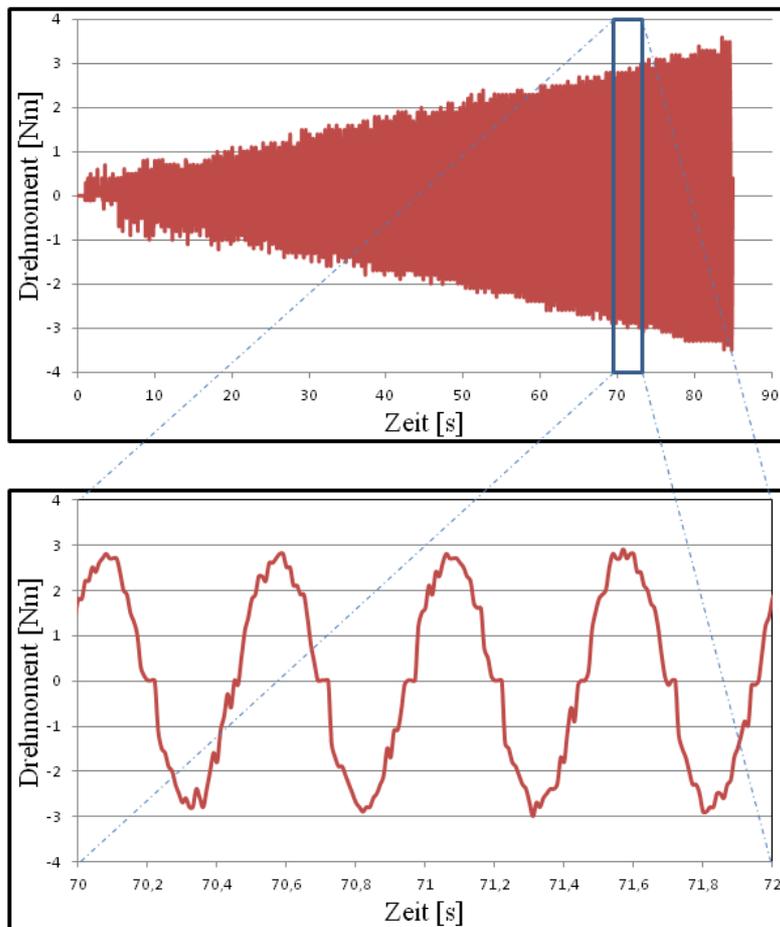


Bild 6.14: Mit dem Frequenzumrichter gemessener, linear ansteigender sinusförmiger Drehmoment-Verlauf während eines Amplituden-Tests mit einer Frequenz von 2 Hz

Bild 6.15 zeigt die Erzeugung der sinusförmigen Drehmomentvorgabe mit steigender Amplitude mit CoDeSys. Der Eingang **AMPLITUDE** des Funktionsblocks **Sinus\_Generator** vom Typ **GEN** (Schritt 0) wird über die Variable **Amplitude** (Schritt 4) im 10 ms-Takt um eine Einheit erhöht. Dazu ändert der Funktionsblock **Amplitude\_erhoehen** vom Typ **BLINK** (Schritt 1) den Wert der booleschen Ausgangsvariable **.OUT** im 10 ms-Takt. Der Funktionsblock **Flankenerkennung** vom Typ **F\_TRIG** (Schritt 2) erkennt eine fallende Flanke (Wechsel von TRUE auf FALSE) und gibt über die Ausgangsvariable **Q** den booleschen Wert TRUE aus, der eine einmalige Erhöhung der Variable **Amplitude** um eine Einheit durch den Operator **ADD** (Schritt 3) bewirkt. Der Funktionsblock **Sinus\_Generator** vom Typ **GEN** (Schritt 0) gibt über die Ausgangsvariable **.OUT** Werte mit sinusförmigem Verlauf als Integer aus. Diese Werte werden dem PMSM zyklisch als Sollwert über den Profibus-Parameter **Drehmoment\_Soll\_PMSM** als Word zugewiesen.

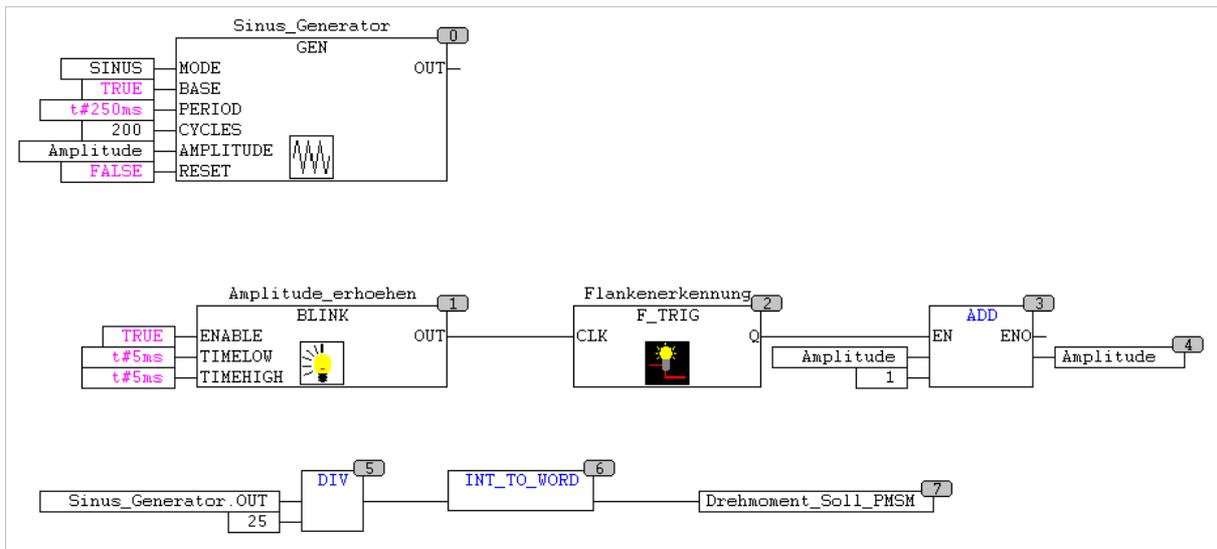


Bild 6.15: Erzeugung des Drehmoment-Amplituden-Sweep mit der Programmiersprache CFC

Der komplexe Schubmodul (Kapitel 2.2.1) beschreibt die viskoelastischen Eigenschaften und lässt sich vektoriell in den Speichermodul  $G'$  (elastischer Anteil) und in den Verlustmodul  $G''$  (viskoser Anteil) zerlegen (Bild 2.26). In den Gleichungen 6.3 und 6.4 werden diese Zusammenhänge auf die Rohdaten des Mischers übertragen:

$$G' = \frac{\tau_{Amplitude}}{\gamma_{Amplitude}} \cdot \cos(\delta) \rightarrow REL' = \frac{M_{Amplitude}}{POS_{Amplitude}} \cdot \cos(\delta) \quad (Gl. 6.3)$$

$$G'' = \frac{\tau_{Amplitude}}{\gamma_{Amplitude}} \cdot \sin(\delta) \rightarrow REL'' = \frac{M_{Amplitude}}{POS_{Amplitude}} \cdot \sin(\delta) \quad (Gl. 6.4)$$

Die Messwerte im Amplituden-Test werden mit 100 Hz von der SPS erfasst und ausgewertet. Die Anzahl der Messwerte während einer Schwingungsperiode ist dabei abhängig von der vorgegebenen Frequenz im Oszillations-Test. In Bild 6.16 ist die Messwertaufnahme über 1000 ms für einen Oszillations-Test bei 2 Hz abgebildet. Die 100 Einzelmesswerte verteilen sich über zwei Schwingungsperioden. Da der Phasenverschiebungswinkel  $\delta$  bei seinem Maximalwert von  $90^\circ$  um eine Viertel Schwingungsperiode verschoben ist, liegen über einen Zeitraum von 125 ms 12,5 Einzelmesswerte vor. Der Phasenverschiebungswinkel von  $90^\circ$  kann folglich durch die 12,5 Einzelmesswerte in Schritte von jeweils  $7,2^\circ$  ( $90^\circ/12,5$  Messwerte) aufgelöst werden.

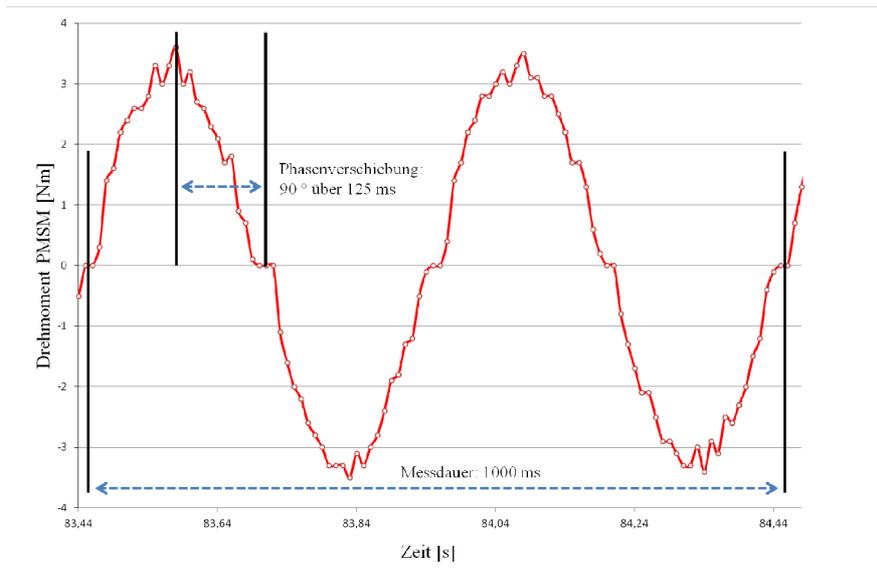


Bild 6.16: 100 mit dem Frequenzumrichter gemessene Werte für das Drehmoment des PMSM während eines Amplituden-Tests mit einer Frequenz von 2 Hz über eine Messdauer von 1000 ms; maximal mögliche Phasenverschiebung von 90° entspricht einer Messdauer von 125 ms und 12,5 Messwerten

Für die Auswertung des Amplituden-Tests nach Gl. 6.3 und Gl. 6.4 werden mithilfe von Standard-Funktionsblöcken in CoDeSys die Maximalwerte  $M_{\text{Amplitude}}$  und  $POS_{\text{Amplitude}}$  sowie deren zeitlicher Abstand untereinander - zur Berechnung des Phasenverschiebungswinkels - bestimmt. Bild 6.17 gibt die Messwerte für einen Amplituden-Test an einem Beton der Konsistenzklasse F6 bei 2 Hz, unterhalb der Fließgrenze, wieder.

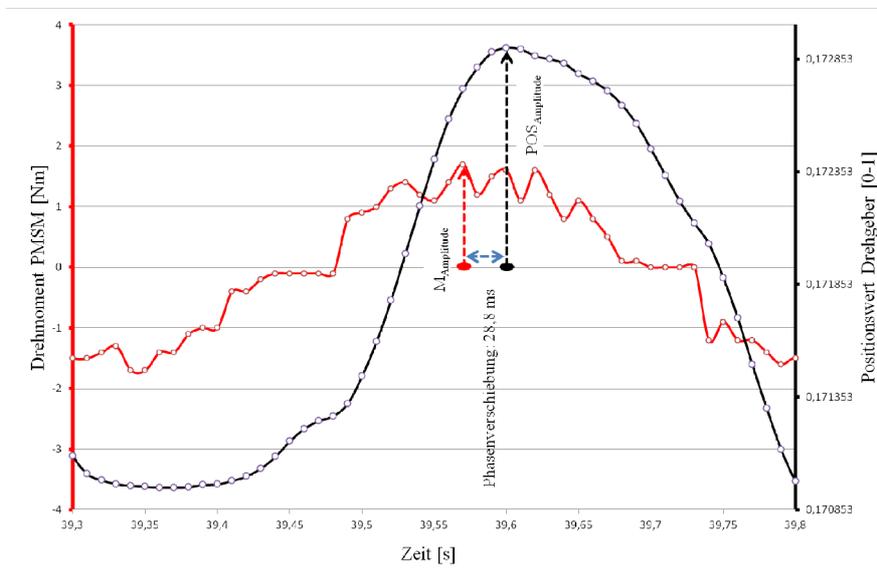


Bild 6.17: Messwerte für das Drehmoment des PMSM und den Drehgeber während eines Amplituden-Tests mit einer Frequenz von 2 Hz an einem Beton der Konsistenzklasse F6 vor Überschreitung der Fließgrenze

Bild 6.18 zeigt die Verläufe vom Drehmoment des PMSM und der Position des Drehgebers nach Überschreitung der Fließgrenze im Amplituden-Test.

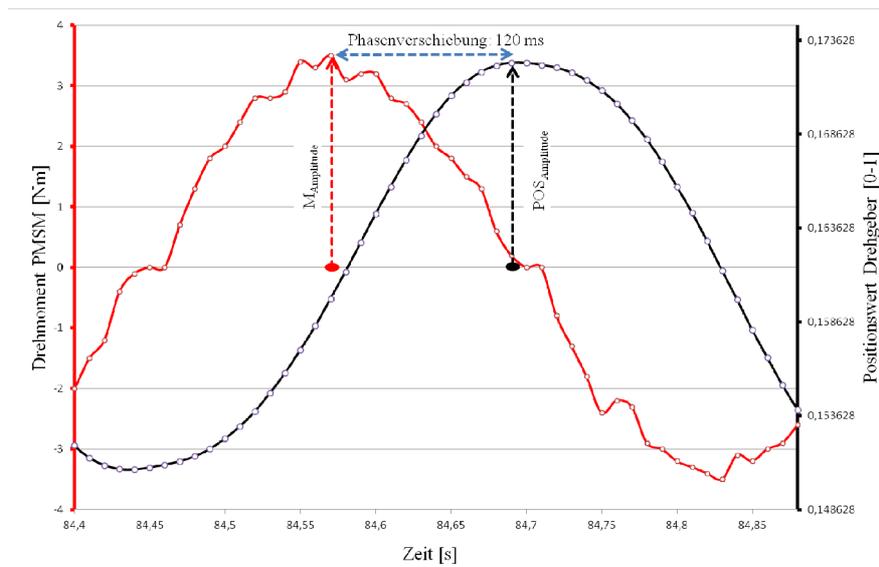


Bild 6.18: Messwerte für das Drehmoment des PMSM und den Drehgeber während eines Amplituden-Tests mit einer Frequenz von 2 Hz an einem Beton der Konsistenzklasse F6 **nach** Überschreitung der Fließgrenze

Die Auswertung des Amplituden-Tests nach den Gleichungen 6.3 und 6.4 über die gesamte Messdauer führt zur Darstellung in Bild 6.19. Solange die Drehmoment-Amplitude unterhalb der Nachgebegrenze ist, liegt keine signifikante Änderung der Probenstruktur vor. Im Nachgiebigkeitsbereich liegt irreversibles Verhalten vor, wobei das elastische Verhalten weiterhin dominiert. Am Schnittpunkt von  $REL'$  und  $REL''$  hat das Material Flüssigkeitscharakter [5].

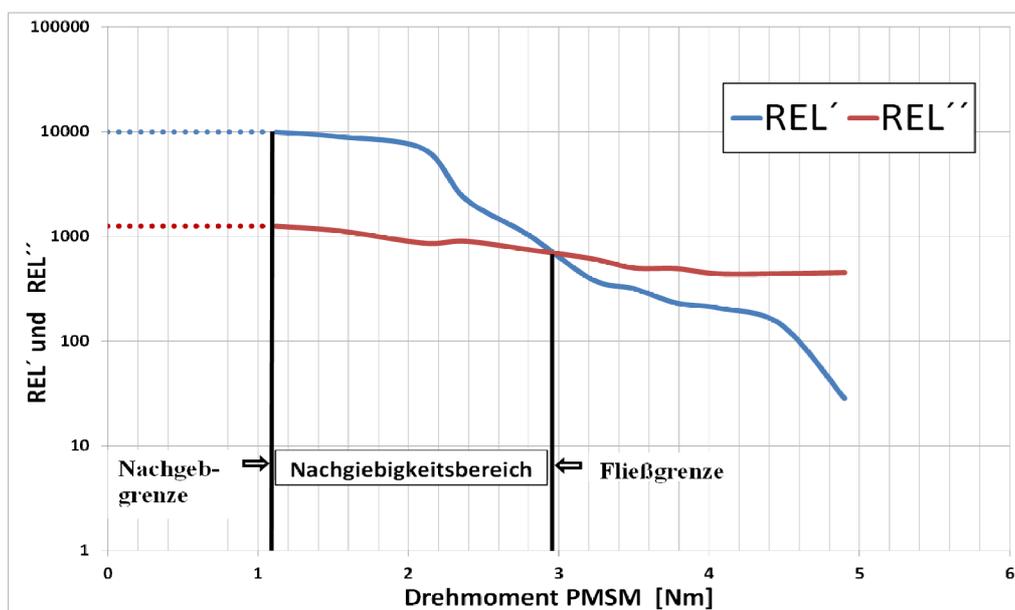


Bild 6.19: Auswertung eines Amplituden-Tests im KKM-R 30 mit dem Mischwerkzeug für einen Beton der Konsistenzklasse F6 bei einer Frequenz von 2 Hz

### 6.3.2 Sprungversuch

Für den Sprungversuch (Kapitel 2.2.1) wurde die Drehmoment-Amplitude im ersten und dritten Abschnitt auf 0,7 Nm und im zweiten Abschnitt auf 4,8 Nm, bei einer Frequenz von 4 Hz, festgelegt. Der Phasenverschiebungswinkel betrug im mittleren Abschnitt (High Shear [5]) erwartungsgemäß  $90^\circ$ . Bereits drei Sekunden nach Ende des zweiten Abschnitts sinkt der Phasenverschiebungswinkel auf den Wert null ab, der auch im ersten Abschnitt unter den Low-Shear-Bedingungen gemessen wurde. Der Sprungversuch liefert für den in dieser Arbeit untersuchten selbstverdichtenden HFVA-Beton somit keine aussagekräftigen Ergebnisse. Der Sprungversuch wird deshalb nicht für die rheologische Bewertung der Mischversuche eingesetzt.

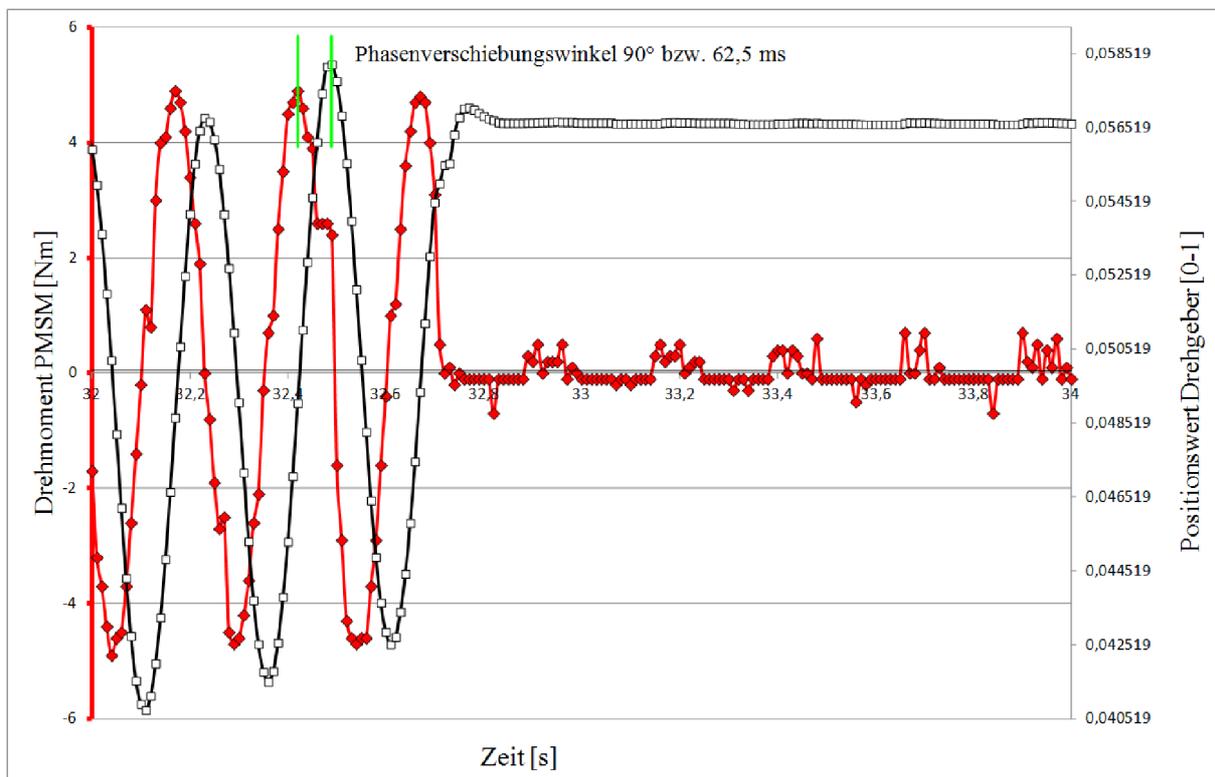


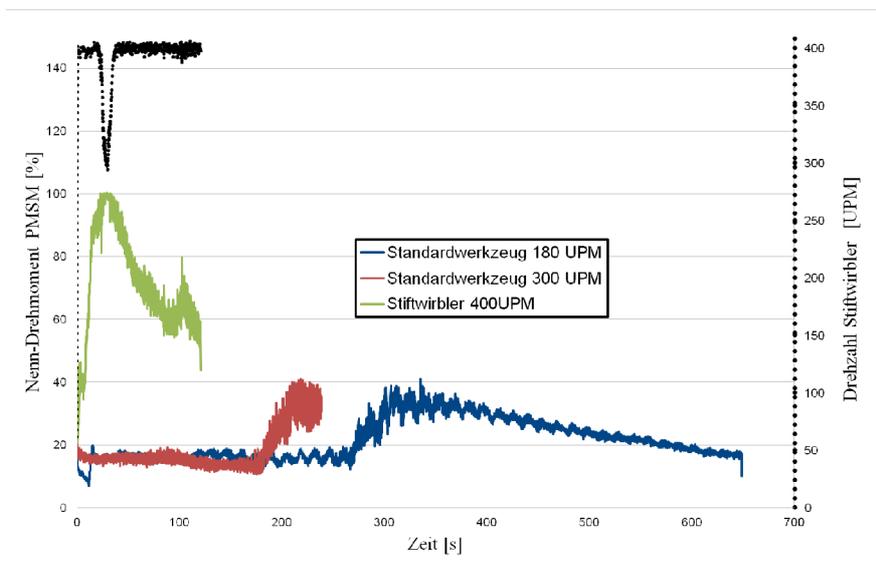
Bild 6.20: Sprungversuch mit einer Frequenz von 4 Hz am Übergang von Abschnitt 2 (High Shear) zu Abschnitt 3 (Low Shear); Phasenverschiebungswinkel  $90^\circ$  mit 62,5 ms Versatz zwischen den Amplituden

### 6.4 Optimierung des inneren Mischwerkzeugs

Durch den Einsatz des variablen Mischwerkzeugs (Bild 4.27) können mit zwei- bzw. dreistufigen Mischregimen Leime und Mörtel hergestellt werden, die über sehr gute rheologische Eigenschaften verfügen. Als langwierig erwies sich jedoch die Grobvermischung der Gesteinskörnung nach Zugabe in der zweiten bzw. dritten Stufe des Mischregimes. Das innere Standardwerkzeug bewirkt durch die schräg stehenden Mischpaddel auch einen Vertikal-Transport des Mischgutes im Mischbehälter und somit eine Grobvermischung. Der ebenfalls verbauterotierende Abstreifer besteht aus einfachen Stahlprofilen und sorgt lediglich dafür, Anhaftungen an der Behälterwandung abzustreifen und somit dem Mischvorgang zugänglich zu machen. Das modulare Mischwerkzeug ist hinge-

gen auf die Dispergierung abgestimmt und verzichtet auf einen Vertikal-Transport. Der Einsatz eines solchen inneren Mischwerkzeuges würde deshalb eine grundsätzliche Umgestaltung des Abstreifers für die Grobvermischung erforderlich machen.

Nach Rücksprache mit dem Hersteller des KKM-R 30 wurde auf diese grundsätzliche Umgestaltung verzichtet. Aus den Versuchen mit dem variablen Mischwerkzeug konnte jedoch eindeutig abgeleitet werden, dass stiftförmige Mischwerkzeuge den Mischvorgang verkürzen und die rheologischen Eigenschaften der damit hergestellten Betone verbessern. Die Unterschiede zum bisherigen inneren Standardwerkzeug verdeutlicht Bild 6.21 für die Herstellung eines Feinkorn-UHPC (Mischung M2Q [87]).



*Bild 6.21: Drehmomentverläufe und Mischzeiten für den UHPC M2Q mit dem Standardwerkzeug des KKM 30 und einem zum Stiftwrbler umgebauten Standardwerkzeug*

Eingesetzt wurde das Standardwerkzeug mit der bisherigen Standard-Drehzahl von 180 UPM sowie mit erhöhter Drehzahl von 300 UPM. Zusätzlich wurde das Standardwerkzeug durch drei Gewindestangen zum Stiftwrbler umgebaut (Bild 6.22). Für den Betrieb des Standardwerkzeugs wurde unabhängig von der Drehzahl maximal 40 Prozent vom Motor-Nenn Drehmoment benötigt. Bei geringer Drehzahl mit niedriger Froude-Zahl wird das Mischgut durch das ganze Mischwerkzeug erfasst. Steigt die Froude-Zahl deutlich an, erfasst das Mischwerkzeug das Mischgut nur noch mit der äußeren Kante. Durch die höhere Drehzahl ist dazu ein höheres Drehmoment erforderlich, allerdings entfällt der Drehmoment-Bedarf für den Vertikal-Transport des Mischgutes durch die mit Neigung verbauten Paddel. Charakteristisch für das Standardwerkzeug ist ein nahezu konstanter Drehmoment-Verlauf über die erste Hälfte der Mischdauer (Bild 6.21). Durch die Anhebung der Drehzahl verkürzt sich die Mischdauer deutlich von über 10 Minuten auf etwa vier Minuten, während die eingebrachte Mischenergie über die Mischdauer nahezu konstant blieb. Durch eine weitere Steigerung der Drehzahl über 300 UPM hinaus lässt sich die Mischdauer aber nicht weiter verkürzen. Durch den Umbau zum Stiftwrbler ändert sich das Drehmoment-Profil, indem das Drehmoment kurz nach Wasserzugabe auf den vorgegebenen Maximalwert von 100 Prozent ansteigt. Dadurch sank die Drehzahl vorübergehend auf etwa 300 UPM ab (Bild 6.21). Durch die zusätzlich verbauten Stifte kann die Motorleistung zu einem deutlich höheren Prozentsatz in das Mischgut eingebracht werden als bei Verwendung des Standardwerkzeugs.



*Bild 6.22: Stiftwirbler abgeleitet aus dem Standard-Werkzeug*

Um sowohl die Anforderungen der Dispergierung als auch die aus der Grobverteilung erfüllen zu können, wurde für die Mischversuche MV1 bis MV 24 die Lösung in Bild 6.23 gewählt. Bei hohen Drehzahlen in der ersten Stufe eines mehrstufigen Mischregimes erfolgt die Dispergierung des Leims bzw. Mörtels bei hohen Zentrifugalkräften in der Randzone des Mischwerkzeugs durch die Stifte. Wird die Drehzahl in der folgenden Stufe abgesenkt, gelangt das gesamte Mischgut in das Zentrum des Mischwerkzeugs und durch die schräg stehenden Paddel wird der für die Grobvermischung erforderliche Vertikal-Transport bewirkt.



*Bild 6.23: Standardwerkzeug des KKM 30 ergänzt um Stifte an den Außenkanten*

### **6.5 Auswirkungen verschiedener Mischregime**

Mit dem Ziel, die Auswertung der Versuchsergebnisse im nachfolgenden Kapitel zu ermöglichen, wurden alle Versuche mit der HVFA-Referenzmischung (Tabelle 6.1) und dem modifizierten Standardwerkzeug des KKM 30 (Bild 6.23) durchgeführt.

Die von [19] beschriebene Festlegung des Mischendes über die Leistungsaufnahme erwies sich bei dem KKM-R 30 als ungeeignet. In Bild 6.24 ist ein charakteristischer Drehmoment-Verlauf des inneren Antriebs (PMSM) für den Mischversuch MV 12 (Bild 6.28) dargestellt.

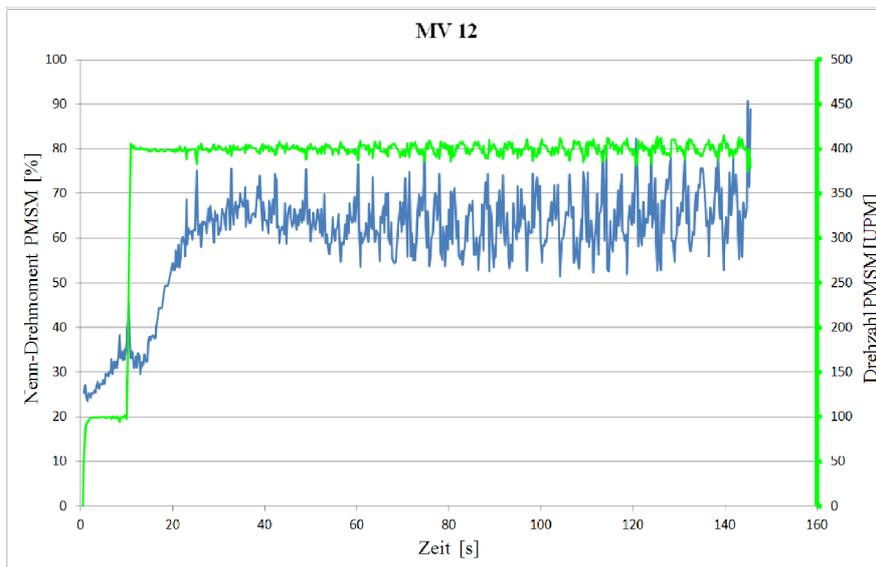


Bild 6.24: Drehmomentverlauf des PMSM während des Mischversuchs MV 12 mit einer Nenndrehzahl von 400 UPM

Es verharrt auf nahezu einem Niveau, obwohl die visuelle Beurteilung klar erkennen ließ, dass mehrere Mischphasen durchlaufen wurden. Da das innere Mischwerkzeug einen großen Spalt zur Innenwandung des Behälters aufweist, ist das vom Mischwerkzeug erfasste Volumen abhängig von der aktuellen Viskosität des Mischgutes. In Bild 6.25 ist der Drehmomentverlauf in einem zweistufigen Mischregime nach der Zugabe der restlichen 40 Prozent Fließmittel aufgezeigt.

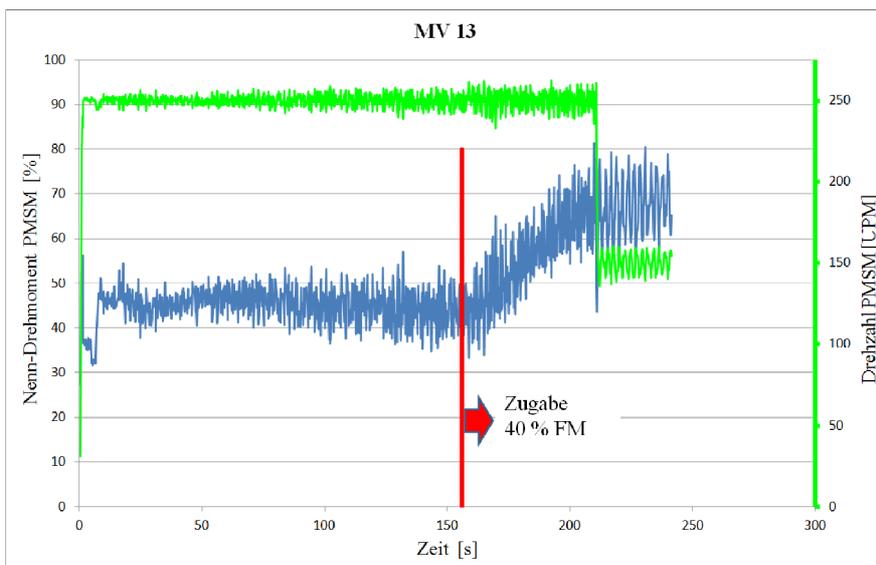
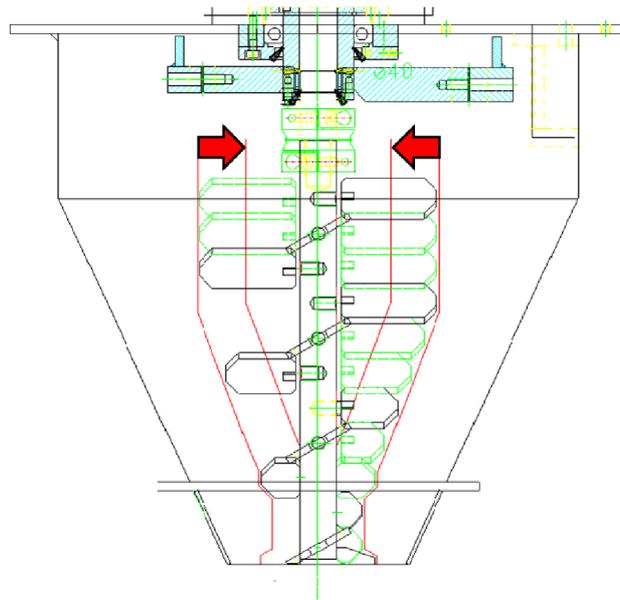


Bild 6.25: Drehmomentverlauf des PMSM während des Mischversuchs MV 13 mit zweistufiger Zugabe des Fließmittels bei einer Nenndrehzahl von 250 UPM

Obwohl das Fließmittel vornehmlich die Fließgrenze des Mischgutes absenkt, wäre ebenfalls ein zumindest tendenzieller Rückgang des Drehmoments infolge leichter Reduktion der Viskosität zu erwarten gewesen. Entgegen dieser Erwartung stieg das Drehmoment erkennbar an. Ursächlich ist, dass das Mischgut nun - trotz hoher Werkzeuggeschwindigkeit - weiter in das Zentrum des Mischwerkzeugs fließen kann als bisher (Bild 6.26). Dadurch wurde es durch die geneigt montierten Mischpaddel erfasst und vertikal transportiert, wofür ein zusätzliches Drehmoment erforderlich war.



*Bild 6.26: Mischbehälter des KKM-R 30 mit dem inneren Standardwerkzeug ohne die Abstreifer an der Innenwandung des Konus. Bei hohen Drehzahlen findet der Kontakt zwischen Mischgut und Mischwerkzeug nur an der äußeren roten Grenzlinie statt. Sinkt die Viskosität des Materials verlagert sich die Grenzlinie nach innen*

Die in Bild 6.28 dargestellten Mischregime wurden gemäß Bild 6.27 variiert, um die Auswirkungen auf die Frischbetoneigenschaften aufzuzeigen:

- **Einstufiges oder zweistufiges Mischregime:** Über das Touch-Panel wurde die Anzahl der Stufen vorgegeben. Bei einstufigen Mischregimen wurden alle Trockenstoffe vorgelegt und 10 Sekunden nach Mischbeginn das Wasser zugegeben. Bei zweistufigen Mischregimen wurde nach einer 10-sekündigen Trockenmischphase zunächst der Mörtel hergestellt und in der zweiten Stufe die Gesteinskörnung hinzugegeben. Die einzelnen Stufen des Mischregimes wurden beendet, nachdem die zuvor vom Benutzer über das Touch-Panel (Bild 4.12) eingegebenen Energiemengen in kW erreicht waren. Dazu wurde die von beiden Motoren des Mixers in das Mischgut eingebrachte Energie über die Frequenzumrichter erfasst und durch die SPS ausgewertet.

- **Mischenergieeintrag:** Die Bestimmung des Mischendes über die Leistungsaufnahme ist, wie in Bild 6.24 und in Bild 6.25 erkennbar, bei dem KKM-R 30 nicht umsetzbar. Der Mischvorgang wurde deshalb beendet, nachdem eine zuvor festgelegte Menge an elektrischer Energie durch die Antriebsmotoren aufgenommen wurde. In Vorversuchen änderten sich die rheologischen Eigenschaften der Referenzmischung nach einem Mischenergieeintrag von  $8,75 \text{ kWh/m}^3$  und einer Nenndrehzahl von 100 UPM nur noch marginal. Für die Mischversuche wurden die Mischenergieeinträge  $8,75 \text{ kWh/m}^3$  (100 %),  $5,25 \text{ kWh/m}^3$  (60 %) und  $3,50 \text{ kWh/m}^3$  (40 %) festgelegt, um die Auswirkungen des Mischregimes aufzeigen zu können.
- **Werkzeuggeschwindigkeit:** Die maximale Drehzahl des Standardwerkzeugs beträgt bei dem Seriengerät KKM 30 etwa 180 UPM. Der in der vorliegenden Arbeit eingesetzte KKM-R 30 mit Direktantrieb deckt einen Drehzahlbereich von 0 UPM - 1000 UPM ab. In den einstufigen Mischregimen wurde die Drehzahl auf maximal 500 UPM und bei zweistufigen Mischregimen - mit Herstellung von Leim/Mörtel in der ersten Stufe - auf maximal 1000 UPM erhöht.
- **Fließmittel:** Das Fließmittel wurde zu unterschiedlichen Zeitpunkten zugegeben. Entweder vollständig mit dem Zugabe-Wasser oder aber eine Teilmenge von 60 Prozent mit dem Zugabe-Wasser und die restlichen 40 Prozent zu einem späteren Zeitpunkt. Das Fließmittel ist die einzige Komponente, deren Menge mit 4,5 kg bis 6 kg an das Mischregime angepasst wurde.
- **Mischversuche MV 24 und MV 25:** Im Mischversuch MV 24 erfolgte die Herstellung von 30 l Leim im KKM-R 30 bei zweistufiger Zugabe des Fließmittels. Durch einen extrem langsam laufenden Einwellen-Mischer (2 UPM) und eine Mischdauer von 20 Minuten, wurde ein Transportbeton-Fahrmischer nachgestellt, in dem die Vermischung des Leims mit dem Sand und der Gesteinskörnung erfolgte. Die Menge an Frischbeton, die im KKM-R 30 in drei Einzelchargen hergestellt wird, kann somit durch eine Charge Leim - und das Vermischen mit dem Sand und der groben Gesteinskörnung im Fahrmischer - bereitgestellt werden. Da bei diesem Vorgehen zwei von drei Einzelchargen entfallen, erhöht sich der Durchsatz des Mixers erheblich, der Verschleiß wird verringert und elektrische Energie für den Mischerantrieb wird eingespart. Der Mischversuch MV 24 wurde durchgeführt, um die Auswirkungen dieses Vorgehens auf die Rheologie des Frischbetons aufzuzeigen. In Mischversuch MV 25 erfolgte die Leim-Herstellung in einem Suspensions-Mischer und die Vermischung des Leims mit dem Sand und der Gesteinskörnung in einem Einwellen-Mischer mit 2 UPM (wie in MV 24). Auch hier wurden die Auswirkungen auf die Rheologie untersucht.

Die rheologische Charakterisierung der Frischbetone erfolgte mit dem Rheometer ICAR (Kapitel 5.2), dem KKM-R 30 und der modifizierten LCPC Box (Kapitel 5.1). Das Erstarrungsende wurde mit BEUS (Kapitel 5.3) bestimmt, die 1d-Würfel-Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 (2009).

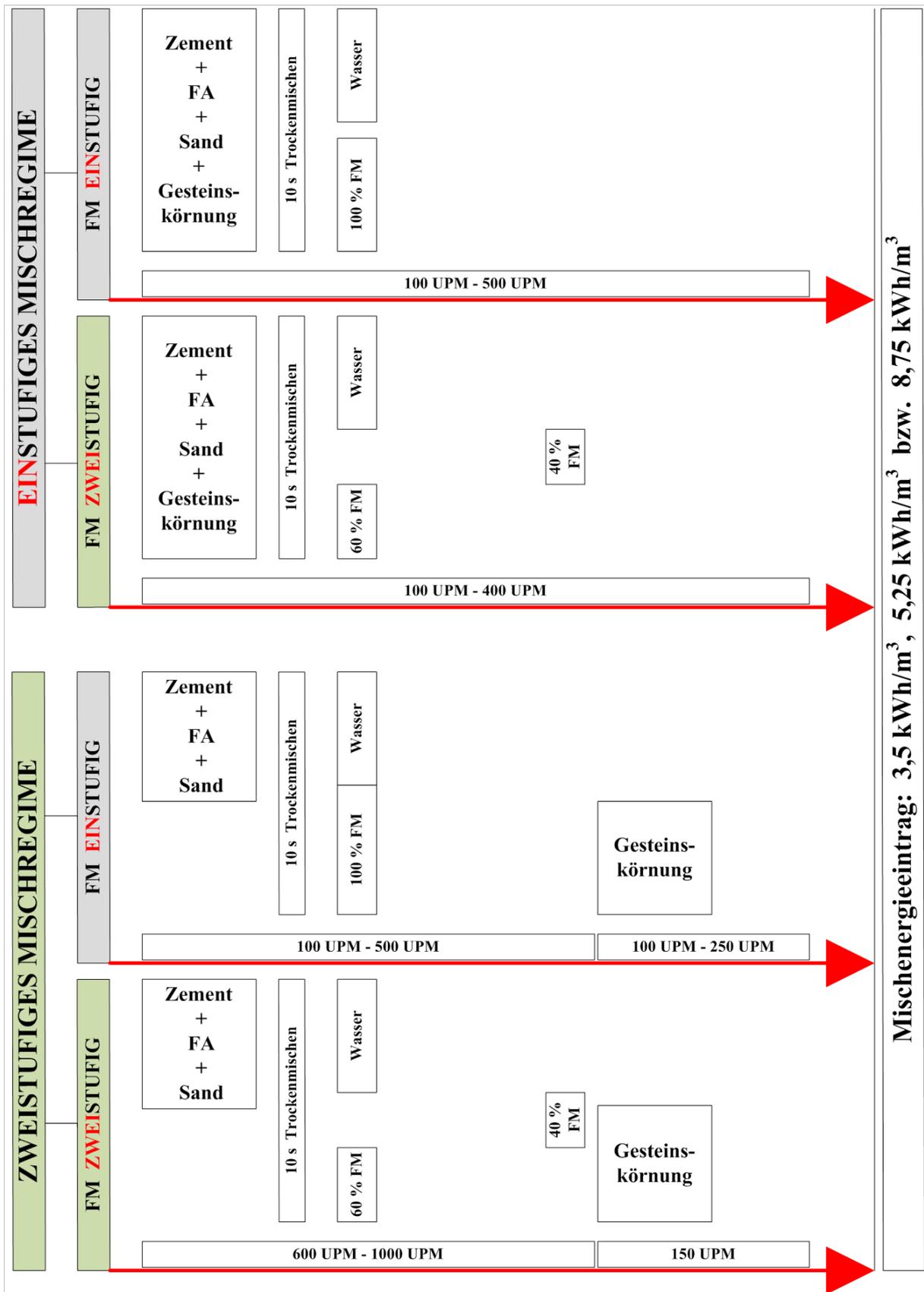


Bild 6.27: Zugabe-Reihenfolge der Ausgangsstoffe für die einstufigen und zweistufigen Mischregime MV 1 - MV 23

	einstufiges Mischregime		zweistufiges Mischregime	
	Fließmittel einstufig	Fließmittel zweistufig	Fließmittel einstufig	Fließmittel zweistufig
8,75 kWh/m <sup>3</sup>	<b>MV 1</b> 100 UPM bis 8,75 kWh/m <sup>3</sup> 52,5 R HS-NA 6 kg FM nach 10 s	<b>MV 4</b> 100 UPM bis 8,75 kWh/m <sup>3</sup> 3,6 kg FM nach 10 s 2,4 kg FM nach 5,55 kWh/m <sup>3</sup>	<b>MV 6</b> 500 UPM bis 7 kWh/m <sup>3</sup> 100 UPM bis 8,75 kWh/m <sup>3</sup> 6 kg FM nach 10 s	
	<b>MV 2</b> 100 UPM bis 8,75 kWh/m <sup>3</sup> 6 kg FM nach 10 s	<b>MV 5</b> 400 UPM bis 8,75 kWh/m <sup>3</sup> 3,6 kg FM nach 10 s 2,4 kg FM nach 5,55 kWh/m <sup>3</sup>		
	<b>MV 3</b> 250 UPM bis 8,75 kWh/m <sup>3</sup> 6 kg FM nach 10 s			
5,25 kWh/m <sup>3</sup>	<b>MV 7</b> 100 UPM bis 5,25 kWh/m <sup>3</sup> 6 kg FM nach 10 s	<b>MV 11</b> 100 UPM bis 5,25 kWh/m <sup>3</sup> 3,6 kg FM nach 10 s 2,4 kg FM nach 3,55 kWh/m <sup>3</sup>	<b>MV 15</b> 400 UPM bis 3,95 kWh/m <sup>3</sup> 100 UPM bis 5,25 kWh/m <sup>3</sup> 6 kg FM nach 10 s	<b>MV 17</b> 600 UPM bis 3,7 kWh/m <sup>3</sup> 150 UPM bis 5,25 kWh/m <sup>3</sup> 3,6 kg FM nach 10 s 2,4 kg FM nach 1,85 kWh/m <sup>3</sup>
	<b>MV 8</b> 400 UPM bis 5,25 kWh/m <sup>3</sup> 6 kg FM nach 10 s	<b>MV 12</b> 400 UPM bis 5,25 kWh/m <sup>3</sup> 3,6 kg FM nach 10 s 2,4 kg FM nach 2,78 kWh/m <sup>3</sup>	<b>MV 16</b> 250 UPM bis 4,3 kWh/m <sup>3</sup> 250 UPM bis 5,25 kWh/m <sup>3</sup> 6 kg FM nach 10 s	<b>MV 18</b> 1000 UPM bis 3,7 kWh/m <sup>3</sup> 150 UPM bis 5,25 kWh/m <sup>3</sup> 2,7 kg nach 10 s 1,8 kg nach 1,67 kWh/m <sup>3</sup>
	<b>MV 9</b> 500 UPM bis 5,25 kWh/m <sup>3</sup> 4 kg FM nach 10 s	<b>MV 13</b> 250 UPM bis 5,25 kWh/m <sup>3</sup> 2,7 kg FM nach 10 s 1,8 kg FM nach 3,24 kWh/m <sup>3</sup>		
	<b>MV 10</b> 500 UPM bis 5,25 kWh/m <sup>3</sup> 4,5 kg FM nach 10 s	<b>MV 14</b> 150 UPM bis 5,25 kWh/m <sup>3</sup> 2,7 kg FM nach 10 s 1,8 kg FM nach 3,24 kWh/m <sup>3</sup>		
3,50 kWh/m <sup>3</sup>		<b>MV 19</b> 300 UPM bis 3,50 kWh/m <sup>3</sup> 3,6 kg FM nach 10 s 2,4 kg FM nach 2,1 kWh/m <sup>3</sup>	<b>MV 21</b> 100 UPM bis 2,07 kWh/m <sup>3</sup> 100 UPM bis 3,50 kWh/m <sup>3</sup> 6 kg FM nach 10 s	<b>MV 22</b> 600 UPM bis 2,1 kWh/m <sup>3</sup> 150 UPM bis 3,50 kWh/m <sup>3</sup> 3,6 kg nach 10 s 2,4 kg nach 1,39 kWh/m <sup>3</sup>
		<b>MV 20</b> 250 UPM bis 3,50 kWh/m <sup>3</sup> 2,7 kg FM nach 10 s 1,8 kg FM nach 1,76 kWh/m <sup>3</sup>		<b>MV 23</b> 1000 UPM bis 2,3 kWh/m <sup>3</sup> 150 UPM bis 3,50 kWh/m <sup>3</sup> 2,7 kg nach 10 Sekunden 1,8 kg nach 1,16 kWh/m <sup>3</sup>
Leim	<b>MV 24</b> 1000 UPM bis 2,3 kWh/m <sup>3</sup> 3 kg FM nach 5 s 1,5 kg FM bei 1,6 kWh/m <sup>3</sup>	<b>MV 25</b> Suspensions-Mischer 1200 UPM bis 5,25 kWh/m <sup>3</sup> 6 kg FM im Anmachwasser		

Bild 6.28: Auflistung der durchgeführten Mischversuche MV 1 - MV 25 mit den jeweiligen Mischregimen

## 7 Auswertung der Versuchsergebnisse

### 7.1 Bestimmung rheologischer Parameter im Mischer KKM-R 30

#### 7.1.1 Fließkurven

Die Fließkurven wurden mit dem KKM-R 30 nach dem in Bild 6.7 dargestellten Messregime nach den Vorgaben in Tabelle 6.3, durchgeführt. Aus den Messungen wurden jeweils neun Wertepaare aus der tatsächlichen Drehzahl und dem tatsächlichen Drehmoment gebildet. Die Darstellung der daraus gebildeten Fließkurven (siehe Anhang) erfolgt aus Gründen der Übersichtlichkeit in den 10 Untergruppen gemäß Bild 6.28, in denen nach ein- und zweistufigem Mischregime, nach ein- und zweistufiger Fließmittelzugabe und drei Mischenergie-Niveaus unterschieden wurde. Das für die Aufrechterhaltung der Drehzahl erforderliche Drehmoment ist von der Viskosität des Betons abhängig. Die Viskosität der nach Bild 6.28 hergestellten Betone kann folglich aus den Drehmomentverläufen abgeleitet werden.

30 Minuten nach Wasserzugabe haben sich die Fließkurven – unabhängig vom Mischregime – weitestgehend stabilisiert. Bild 7.1 zeigt exemplarisch für den Mischversuch MV 7 die Entwicklung vom Mischende bis 90 Minuten nach Wasserzugabe.

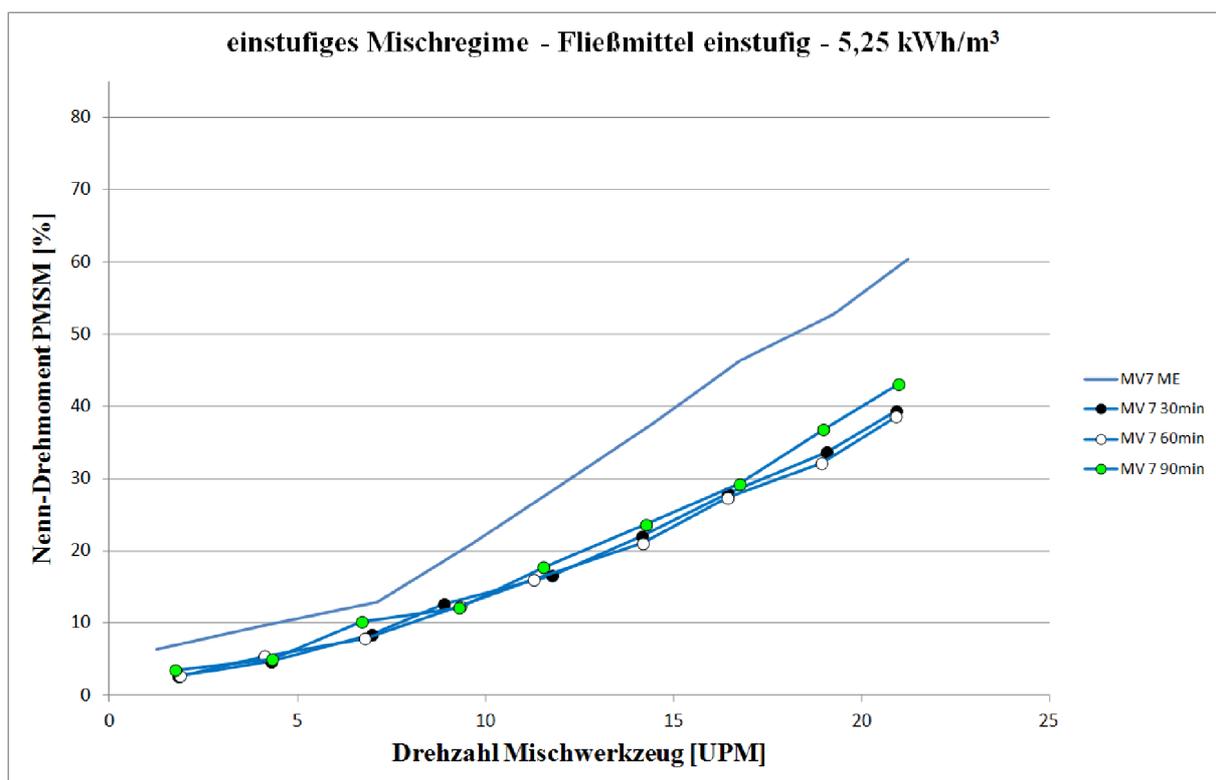


Bild 7.1: Fließkurven für MV 7 nach Mischende (ME), 30 min, 60 min und 90 min nach Mischende

Die rheologische Bewertung der Frischbetoneigenschaften im Mischer erscheint jedoch nur dann sinnvoll, wenn sich diese nach Mischende nur noch geringfügig verändern. Um die Ergebnisse aus den Mischversuchen untereinander vergleichen zu können, wurden die rheologischen Parameter  $g$  und  $h$  durch die Regressionsgerade der Fließkurve bestimmt. Die Differenz zwischen den Messwerten und den berechneten Werten auf der Regressions-

geraden werden als Residuen bezeichnet. Neben der Größe gibt der Vorzeichenwechsel der Residuen Aufschluss darüber, ob die verwendete Geradengleichung die vorliegenden Daten überhaupt beschreibt. In Bild 7.2 wechseln die Vorzeichen der Residuen für MV 13 30 min nicht zufällig und die Größe der Residuen schwankt stark, was auf Nichtlinearität hinweist [88]. Da die Nichtlinearität bei der Mehrzahl der Mischversuche deutlich geringer ausgeprägt gewesen ist, wurden die Regressionsgeraden als Näherung, zur Unterscheidung der Mischversuche untereinander, berechnet. Das Bestimmtheitsmaß  $r^2$  quantifiziert wie dicht die Regressionsgerade an den Messpunkten liegt (Bild 7.2).

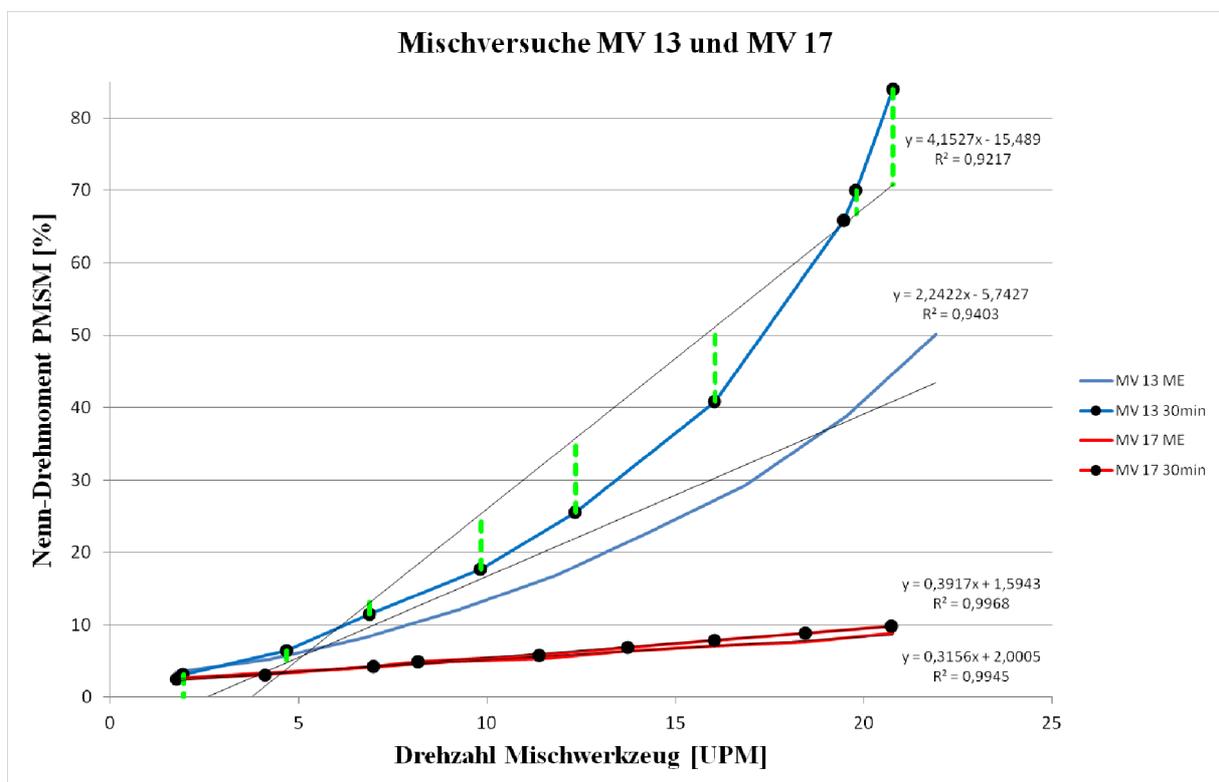


Bild 7.2: Regressionsgeraden, zugehörige Funktionen und die Bestimmtheitsmaße für die Mischversuche MV 13 und MV 17

Die Bestimmtheitsmaße der Regressionsgeraden sind bei zweistufig hergestellten Betonen höher und schwanken zwischen Mischende und 30 Minuten nach Mischende weniger, als bei einstufig hergestellten Betonen (Bild 7.3). Insbesondere in Mischversuchen mit einer reduzierten Fließmittelmenge von  $4,5 \text{ kg/m}^3$  Frischbeton werden die Unterschiede deutlich erkennbar. Die mit einem einstufigen Mischregime hergestellten Betone der Mischversuche MV 13 und MV 14 führten zu deutlich geringeren Bestimmtheitsmaßen. Durch ein zweistufiges Mischregime bei MV 18 und MV 23 konnten die Werte für das Bestimmtheitsmaß deutlich erhöht werden.

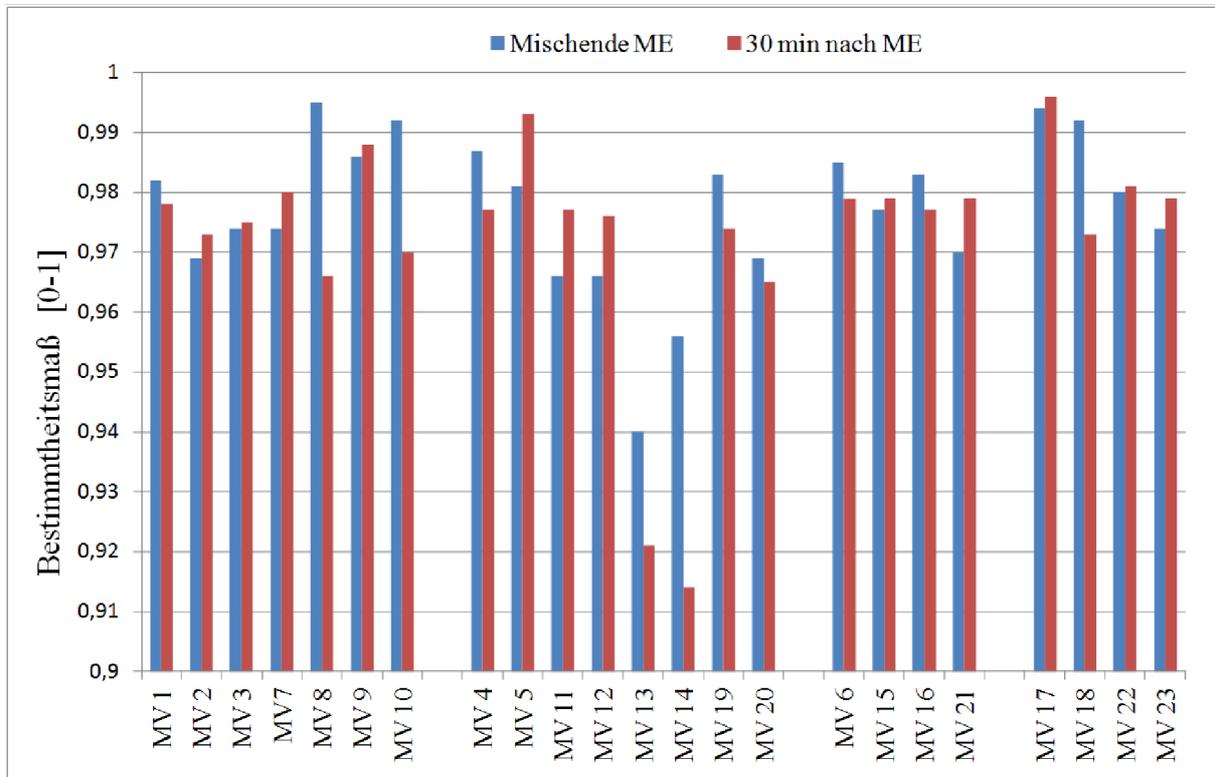


Bild 7.3: Bestimmtheitsmaße für die Regressionsgeraden der mit dem KKM-R 30 gemessenen Fließkurven nach Mischende (ME) und 30 min nach Mischende

Die Mischversuche MV 13 und MV 14 weisen ein unterdurchschnittliches Bestimmtheitsmaß  $r^2$  auf und werden durch die Regressionsgerade nur ungenügend beschrieben.

Für Bild 7.4 wurden die Steigungen der Regressionsgeraden für die Fließkurven nach Mischende (ME) und 30 Minuten nach Mischende ausgewertet. Die Differenz aus der Steigung unmittelbar nach Mischende und 30 Minuten nach Mischende ist ein Maß für die Veränderung der plastischen Viskosität innerhalb der ersten 30 Minuten. Mischregime die zu hohen Differenzen führen (MV 7, MV 8, MV 10, MV 13, MV 14, MV 20, MV 15 und MV 16), sind für eine Bewertung der rheologischen Eigenschaften unmittelbar nach Mischende nicht geeignet, da die bestimmten Parameter lediglich kurz nach Mischende Gültigkeit besitzen.

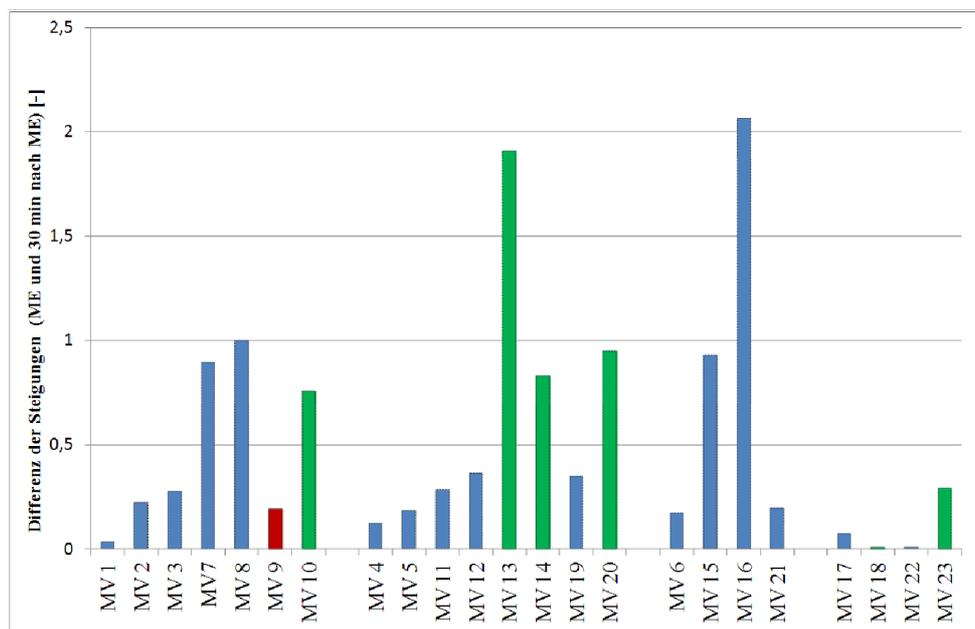


Bild 7.4: Differenzen aus den Steigungen der Regressionsgeraden der Fließkurven MV 1 - MV 23 nach Mischende (ME) und 30 min nach Mischende; blaue Säulen: Betone mit 6kg FM/m<sup>3</sup>; grüne Säulen: Betone mit 4,5 kg FM/m<sup>3</sup>; rote Säule: Beton mit 4kg FM/m<sup>3</sup>

Die Mischversuche MV 1 bis MV 6, die mit einem Mischenergieeintrag von 8,75 kWh/m<sup>3</sup> hergestellt wurden, wiesen unabhängig vom Mischregime niedrige Differenzen auf. Sank der Mischenergieeintrag auf 5,25 kWh/m<sup>3</sup>, erreichten Mischregime mit zweistufiger Fließmittelzugabe niedrige Werte. Durch die deutliche Anhebung der Werkzeugdrehzahl auf 500 UPM konnte auch in einem einstufigen Mischregime - bei reduzierter Fließmittelmenge - eine nur geringfügige Veränderung der plastischen Viskosität erreicht werden. Bei einer weiteren Absenkung des Mischenergieeintrags auf 3,5 kWh/m<sup>3</sup> erwiesen sich zweistufige Mischregime und einstufige Mischregime mit zweistufiger Fließmittelzugabe bei hoher Werkzeugdrehzahl als geeignet. Zusammenfassend wiesen zweistufige Mischregime - mit einer sehr hohen Werkzeugdrehzahl in der ersten Stufe und einer zweistufigen Fließmittelzugabe - die niedrigsten Veränderungen innerhalb von 30 Minuten auf (Bild 7.4 rechts). Die unmittelbar nach Mischende bestimmten rheologischen Parameter sind bei den gewählten Mischregimen folglich aussagekräftig für den relevanten Verarbeitungszeitraum.

Alternativ wurde die Menge an elektrischer Energie bestimmt, die während der Messung der Fließkurve benötigt wurde. Unberücksichtigt blieb die Energiemenge, die in den ersten 10 Sekunden (Vorscherphase) und in der jeweils ersten Sekunde der einzelnen Stufen benötigt wurde. Mögliche Anlaufeffekte zu Beginn der Messung und bei den Drehzahlsprüngen hatten folglich keinen Einfluss auf die berechnete Energiemenge. Für die Berechnung standen 270 Wertepaare aus der tatsächlichen Drehzahl und dem tatsächlichen Drehmoment für neun Stufen, mit einer Länge von jeweils drei Sekunden, zur Verfügung (Bild 7.5; Messfrequenz 10 Hz).

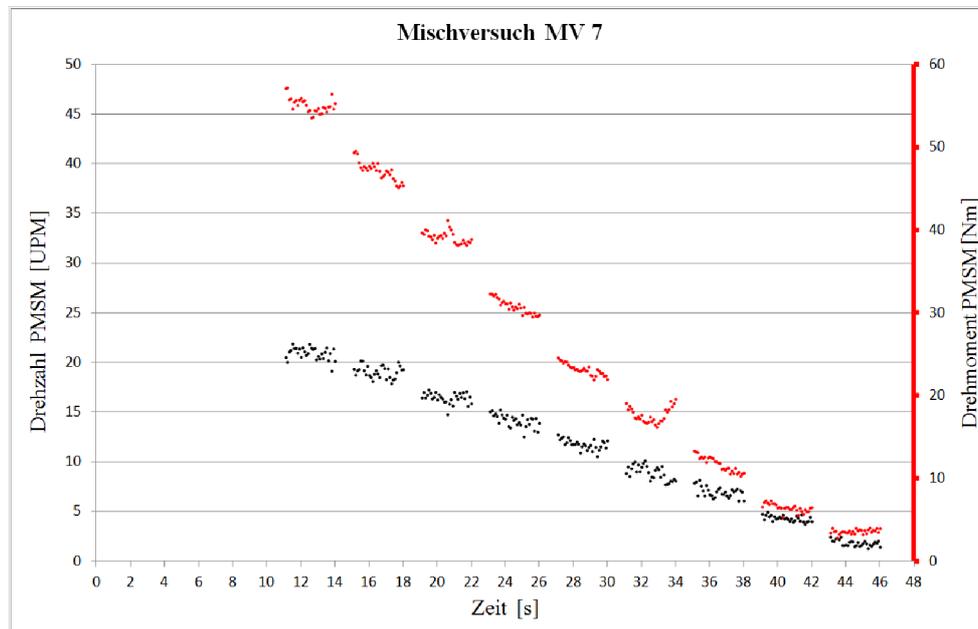


Bild 7.5: Drehzahl [UPM] und Drehmoment [Nm] des PMSM während der Messung der Fließkurve für den Mischversuch MV 7 30min nach Mischende. Die nicht dargestellten ersten 10 Sekunden (Vorscherung) und die jeweils erste Sekunde der neun Stufen gingen nicht in die weitere Berechnung ein

Die Berechnung der Energiemenge  $P_{kWs}$  in Kilowattsekunden erfolgt mit der Drehzahl  $n$  in Umdrehungen pro Minute ( $\text{min}^{-1}$ ) und dem Drehmoment  $M$  in Newtonmeter (Nm) nach Gleichung 7.1:

$$P_{kWs} = \sum_{k=1}^{270} \left( \frac{n_k \cdot M_k}{955} \right) \quad (\text{Gl.7.1})$$

Im Anschluss wurde die Differenz aus der nach Mischende (ME) und 30 Minuten nach Mischende berechneten Energiemenge  $P_{kWs}$  bestimmt. Die Differenzen aus den Mischversuchen MV 1 - MV 23 wurden auf den Maximalwert normiert und den - ebenfalls auf den Maximalwert normierten Differenzen aus den Steigungen der Regressionsgeraden (Bild 7.4) - gegenübergestellt (Bild 7.6). Die Unterschiede zwischen den einzelnen Mischversuchen werden durch beide Verfahren mit einer sehr hohen Übereinstimmung erkennbar.

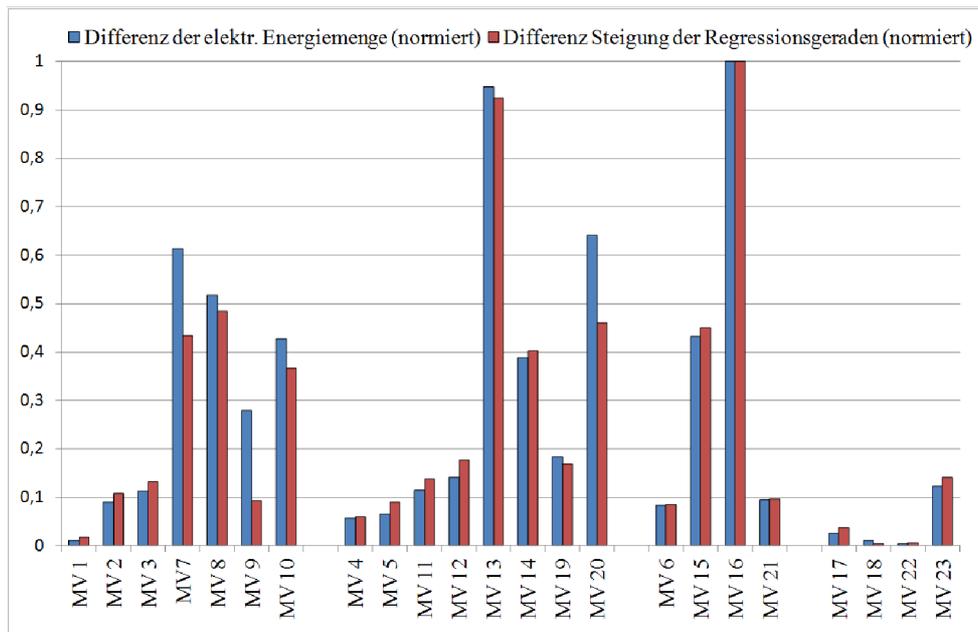


Bild 7.6: Gegenüberstellung der normierten Differenzen: Energiemengen  $P_{kws}$  und Steigungen der Regressionsgeraden aus den Fließkurven nach Mischende und 30 Minuten nach Mischende für die Mischversuche MV 1 bis MV 23

Die Auswirkungen der in Bild 6.28 festgelegten Mischregime auf die plastische Viskosität des Betons und die Mischdauer werden, durch die Normierung auf die jeweiligen Maximalwerte, in Bild 7.8 aufgezeigt. Die Mischversuche MV 2 mit einstufiger und MV 4 mit zweistufiger Zugabe des Fließmittels zeigen die Ausgangssituation auf. Die Herstellung der Betone mit niedriger Viskosität erforderte bei niedriger Werkzeugdrehzahl einen hohen Mischenergieeintrag bei langen Mischzeiten. Eine Verringerung des Mischenergieeintrags führte zu einer deutlichen Erhöhung der plastischen Viskositäten. Die Anhebung der Werkzeugdrehzahl verringerte die plastische Viskosität und verkürzte die Mischdauer zur Einbringung der vorgegebenen Mischenergie. Nach WALLEVIK [53] beeinflusst die Fließmittelmenge die plastische Viskosität des Leims sehr stark, die des Mörtels deutlich geringer und die des Betons gar nicht (Bild 7.7). Bild 7.8 belegt für den HVFA-Beton jedoch eine erhebliche Abhängigkeit der plastischen Viskosität von der eingesetzten Fließmittelmenge und dem gewählten Mischregime.

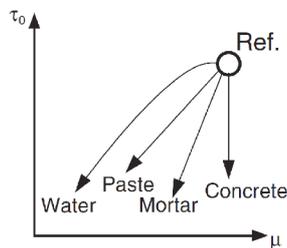


Bild 7.7: Unterschiedliches Verhalten von Leim, Mörtel und Beton bei Steigerung der Fließmittelmenge [53]

Durch zweistufige Mischregime gelang es, die niedrigsten plastischen Viskositäten zu erreichen. Im untersuchten Zeitraum bis 30 Minuten nach Mischende zeigten die so hergestellten Betone zudem die geringsten Veränderungen der rheologischen Eigenschaften. Die unmittelbar nach Mischende bestimmten rheologischen Parameter verändern sich somit über die Verarbeitungsphase hinweg nur geringfügig. Durch hohe Werkzeugdrehzahlen in

der ersten Stufe konnte die Mischenergie gezielt in den Mörtel eingebracht werden. Der Energiebedarf für den gesamten Mischvorgang konnte dadurch - bei vergleichbarer plastischer Viskosität - im Mischversuch MV 22, gegenüber der Ausgangssituation im Mischversuch MV 4, auf 40 Prozent abgesenkt werden. Die Mischdauer konnte zudem auf 25 Prozent, gegenüber MV 4, verkürzt werden. Die weitere Anhebung der Werkzeugdrehzahl - von 600 UPM auf 1000 UPM im Mischversuch MV 23 - und eine 25-prozentigen Reduktion der Fließmittelmenge führte zu einer weiteren Verkürzung der Mischdauer auf 17 Prozent (gegenüber MV 4), bei ähnlicher Viskosität (Bild 7.8).

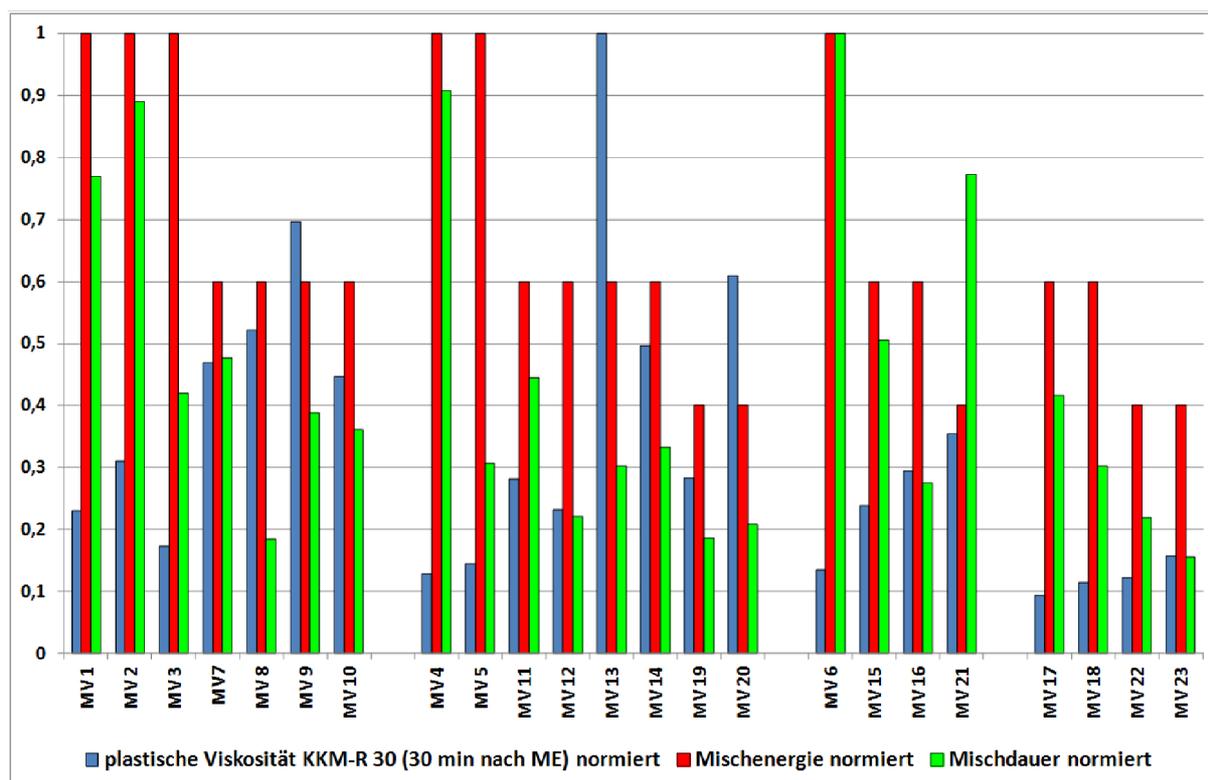


Bild 7.8: Auf Maximalwert (Steigung 4,1527) normierte plastische Viskositäten 30 Minuten nach Mischende im KKM-R 30 (Bruttowerte inkl. Maschinenverluste), auf Maximalwert (8,75 kWh/m<sup>3</sup> Beton) normierte Mischenergie und auf Maximalwert (799 Sekunden) normierte Mischdauer für die Mischversuche MV 1 bis MV 23

Die Auswirkungen der Mischregime MV 4 und MV 23 auf die Werkzeuggeschwindigkeit und die Maschinen-Froude-Zahl sind in Bild 7.9 aufgezeigt. Gegenüber dem Mischversuch MV 4 unter Vorlage aller Trockenstoffe, wurde der Mörtel für MV 23 in der ersten Stufe mit 10-facher Werkzeuggeschwindigkeit bei 100-facher Maschinen-Froude-Zahl hergestellt. Damit wurde eine sehr schnelle Dispergierung und Deagglomeration, ohne den Mahltreibeffect der groben Gesteinskörnung, ermöglicht. Vor Zugabe der groben Gesteinskörnung wurde die Drehzahl auf ein Niveau abgesenkt, das nur geringfügig über dem in Mischregime MV 4 lag. Ein ausgeprägter Partikelabrieb der groben Gesteinskörnung und eine damit einhergehende Verschlechterung der Frischbetoneigenschaften ist somit ausgeschlossen.

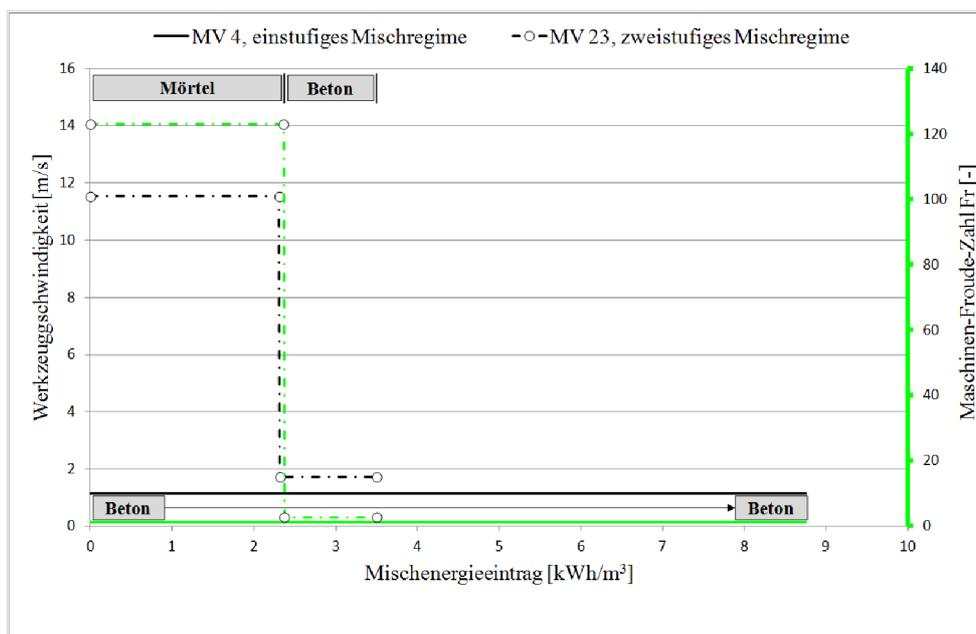


Bild 7.9: Einstufiges Mischregime mit 100 UPM im KKM-R 30 mit einem Mischenergieeintrag von 8,75 kWh/m³ für den Mischversuch MV 4 und zweistufiges Mischregime mit 1000UPM/150 UPM im KKM-R 30 mit einem Mischenergieeintrag von 3,50 kWh/m³ für Mischversuch MV 23

Die Tabelle 7.1 belegt für den Mischversuch MV 24 mit dem Mischversuch MV 13 vergleichbare Viskositäten. Obwohl die mit dem Rheometer bestimmte Fließgrenze für den Beton aus dem Mischversuch MV 24 geringer war, lag das in der LCPC Box bestimmte Setzfließmaß unterhalb von dem aus dem Mischversuch MV 13. Unabhängig davon waren die Messwerte der plastischen Viskosität und der Fließgrenze für den Beton aus MV 24, mit einem von 6 kg/m³ auf 4,5 kg/m³ reduzierten Fließmittelgehalt, für einen Einsatz in der Praxis zu hoch. Durch eine Anhebung der Fließmittelmenge ist eine Verbesserung der rheologischen Eigenschaften zu erwarten. In MV 25 wurde ein solcher Leim mit besseren rheologischen Eigenschaften (Tabelle 7.1) in einem Suspensions-Mischer mit einer Fließmittelmenge von 6 kg/m³ hergestellt. Durch die - gegenüber dem Konus-Mischer deutlich bessere Deagglomeration - ist in MV 25 mit einer größeren Partikeloberfläche und einem höheren Fließmittelbedarf zu rechnen. Somit kann der Leim für drei Einzelchargen des Betons in einer Einzelcharge (MV 24) mit leicht erhöhter Fließmittelmenge und reduziertem Mischenergieeintrag, hergestellt werden.

	MV 18	MV 13	MV 20	MV 23	MV 24	MV 25
Mischenergieeintrag [kWh/m³]	5,25	5,25	3,50	3,50	2,30	5,25
Fließmittel Sika 20 HE [kg/m³]	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	6
Stufe I	Mörtel	Beton	Beton	Mörtel	Leim	Suspensions-Mischer
Drehzahl PMSM (UPM)	1000	250	250	1000	1000	1200
Stufe II	Beton	-	-	Beton	Beton	Beton
Drehzahl PMSM (UPM)	150	-	-	150	Einwellen-Mischer	Einwellen-Mischer
plastische Viskosität ICAR [Pa·s]	181	316	471	210	348	246
Fließgrenze ICAR [Pa]	116,8	168,1	95	94,6	114,9	20,25
LCPC T <sub>700</sub> [s]	29	43	51	37	43	
LCPC Ausbreitmaß	111,5	111	110	106	105	

Tabelle 7.1: Messwerte des Rheometers ICAR RHM-3000 und der modifizierten LCPC Box für zwei Betone mit einstufigem Mischregime (MV 13 und MV 20), zwei Betone mit zweistufigem Mischregime (MV 18 und MV 23) und für zwei Betone mit Herstellung des Leims (MV 24 im KKM-R 30; MV 25 im Suspensions-Mischer Gertec) und Vermengung mit der groben Gesteinskörnung in einem Einwellen-Mischer

### 7.1.2 Dynamische und statische Fließgrenze

Da die Berechnung der dynamischen Fließgrenze über ein rheologisches Modell nur Näherungscharakter hat, erfolgte die Messung unmittelbar nach Stillstand des Mischwerkzeugs gemäß Kapitel 6.2.3. Bild 7.10 zeigt die Fließkurven für fünf Mischversuche, die gemäß Kapitel 7.1.1 bestimmt wurden. Die ebenfalls dargestellten dynamischen Fließgrenzen wurden zusätzlich, unmittelbar nach Mischende, schubspannungsgesteuert gemessen. Da diese Messwerte in allen Fällen kleiner waren als die jeweiligen Drehmomente im Fließversuch bei der geringsten Drehzahl (1,732 UPM), können diese als plausibel betrachtet werden.

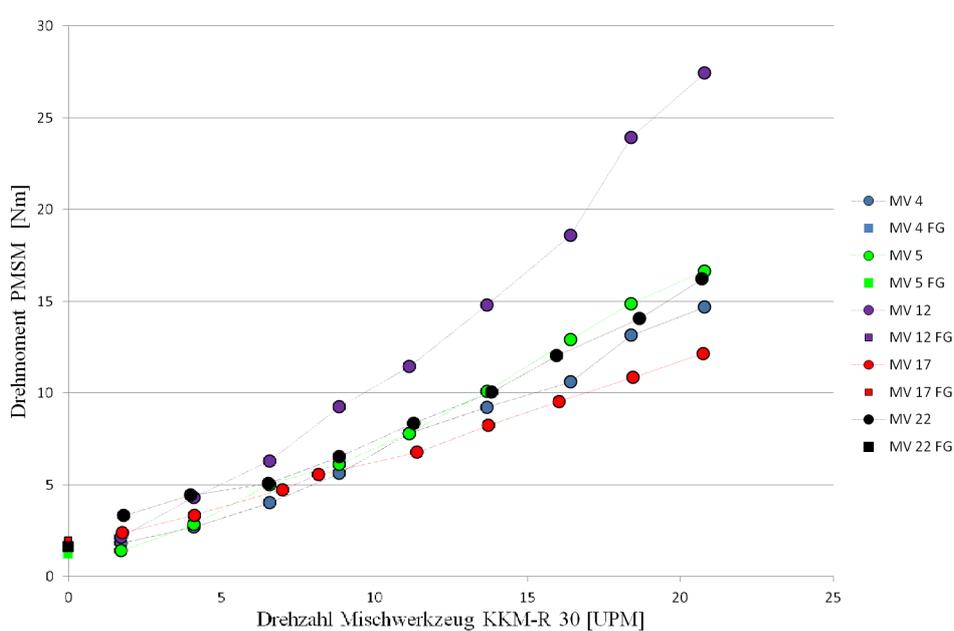


Bild 7.10: dynamische Fließgrenzen, unabhängig bestimmt von den Fließkurven im KKM-R 30 (Nettowerte ohne Maschinenverluste)

Wird die Fließgrenze nach einer festgelegten Ruhephase des Frischbetons als statische Fließgrenze erneut bestimmt, kann die Thixotropie des Betons nach Bild 7.11 bewertet werden. Die mit einem zweistufigen Mischregime hergestellten Betone MV 18 und MV 23 weisen nach einer 30-minütigen Ruhephase einen deutlich geringeren inneren Strukturaufbau auf. Die gemessenen statischen Fließgrenzen sind deshalb deutlich geringer als bei Beton, der mit einem einstufigen Mischregime (MV 20) hergestellt wurde. Durch die Erhöhung der Fließmittelmenge von  $4,5 \text{ kg/m}^3$  auf  $6 \text{ kg/m}^3$  im einstufigen Mischversuch MV 12 wurde die statische Fließgrenze verringert, erreichte jedoch nicht die niedrigen Werte zweistufiger Mischregime.

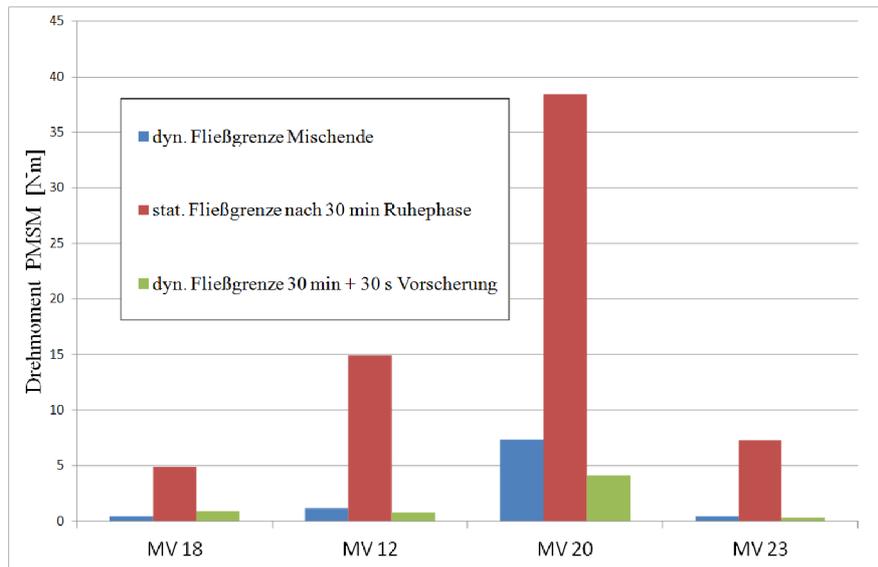


Bild 7.11: Bewertung der thixotropen Eigenschaften durch statische und dynamische Fließgrenzen im KKM-R 30 (Bruttowerte inklusive Maschinenverluste)

## 7.2 Verifizierung des KKM-R 30 durch Vergleichsmessungen

### 7.2.1 KKM-R 30 und Rheometer ICAR RHM-3000

Bild 7.12 zeigt die 30 Minuten nach Mischende mit dem Rheometer ICAR gemessenen Rohdaten für die Fließkurve des Mischversuchs MV 12. Die **Regressionsgerade Rohdaten** bestätigt den mit dem Mischer KKM-R 30 gemessenen nichtlinearen Zusammenhang zwischen Drehzahl und Drehmoment. Die Extrapolation der Regressionsgeraden für die Drehzahl null führt zu einer negativen Fließgrenze. Da dies nach dem Bingham-Modell physikalisch nicht möglich ist, wird die plastische Viskosität durch die Software des Rheometers, unter Annahme einer dynamischen Fließgrenze von 0,1 Pa in absoluten Einheiten, angepasst. Die Steigung der **Regressionsgeraden FG=0**, und damit die plastische Viskosität in absoluten Einheiten, wird durch die Anhebung der Fließgrenze verringert (Bild 7.12).

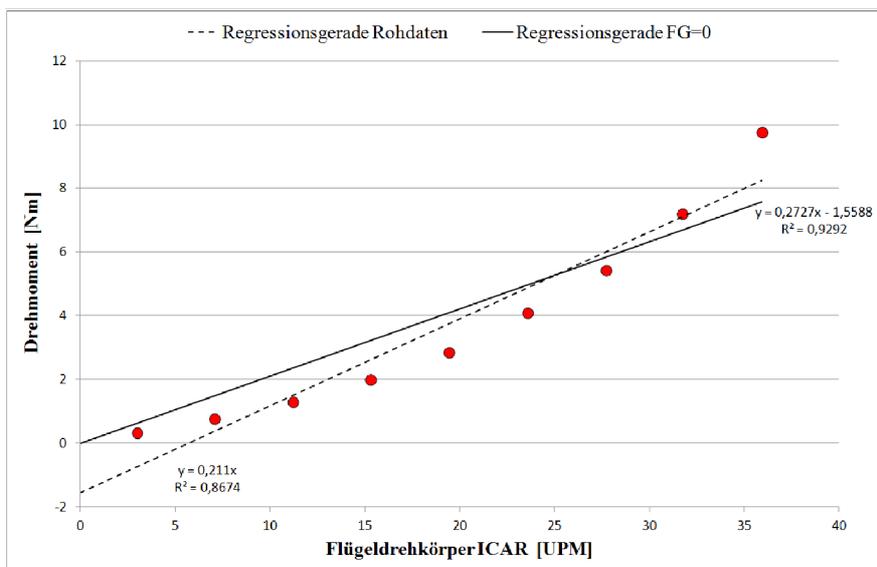


Bild 7.12: Bestimmung der Regressionsgeraden aus den Rohdaten des ICAR Rheometers und Bestimmung einer Regressionsgeraden aus den Rohdaten des ICAR-Rheometers mit Durchgang durch den Ursprung

Die aus den Rohdaten des Rheometers ICAR und die mit dem Mischer KKM-R 30 berechneten Steigungen der Regressionsgeraden (Bild 7.13 ) korrelieren mit einem Bestimmtheitsmaß von fast 92 Prozent. Die in Bild 7.12 aufgezeigte Korrektur durch die Rheometer-Software führt erwartungsgemäß zu einem geringeren Bestimmtheitsmaß, wenn die Korrelation zu der mit dem Rheometer berechneten plastischen Viskosität untersucht wird. In die Berechnung der plastischen Viskosität geht die korrigierte Regressionsgerade (FG=0) - mit Durchgang durch den Ursprung - ein.

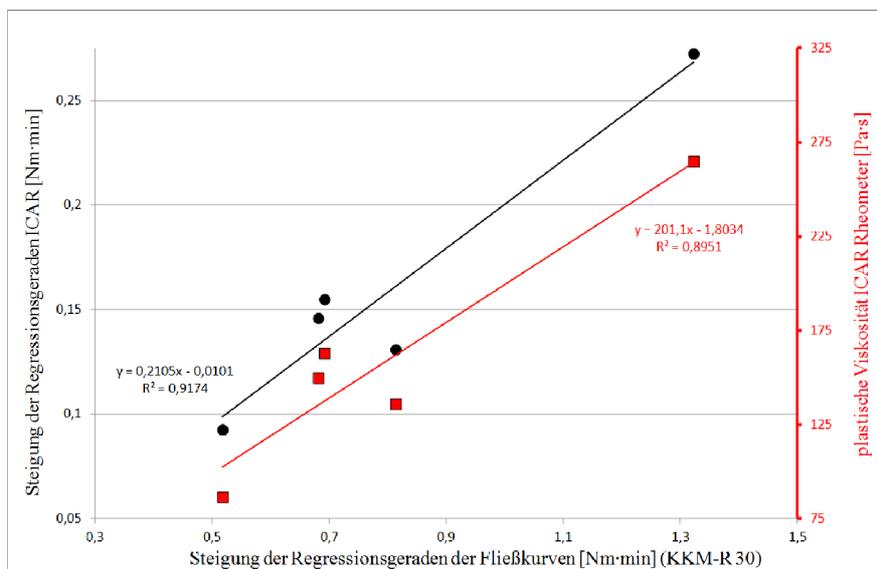


Bild 7.13: Korrelationsdiagramm für die Steigung der Regressionsgeraden aus den Fließkurven, den Steigungen aus den Rohdaten des Rheometers und den berechneten plastischen Viskositäten aus den korrigierten Rohdaten für die Mischversuche MV 4, MV 5, MV 12, MV 17 und MV 22

Die aus der Fließkurve bestimmte Regressionsgerade kann gemäß Bild 7.13 sowohl beim Rheometer ICAR als auch beim KKM-R 30 zur Berechnung der plastischen Viskosität genutzt werden. Allerdings gilt dies nicht für die Fließgrenze. Bei dem in dieser Arbeit untersuchten HVFA-Beton mit selbstverdichtenden Eigenschaften werden durch die Regressionsgerade negative Werte für die Fließgrenze extrapoliert. Die Software des Rheometers legt dann eine Fließgrenze von 0,1 Pa fest und kann folglich die untersuchten Betone hinsichtlich der Fließgrenze nicht unterscheiden. Für Betone mit einem Setzfließmaß von 104 cm - 115 cm in der LCPC Box wurde deshalb eine einheitliche Fließgrenze von 0,1 Pa durch das Rheometer ausgegeben. Alternativ kann die Fließgrenze separat als Messwert bestimmt werden. Dies erfolgt mit dem Rheometer ICAR bauartbedingt scherspannungssteuert (CSD-Methode), beim KKM-R 30 durch die vorzuziehende CSS-Methode, schubspannungsgesteuert. Trotz der unterschiedlichen Messmethoden belegt Bild 7.14 eine hohe Korrelation zwischen den Messwerten.

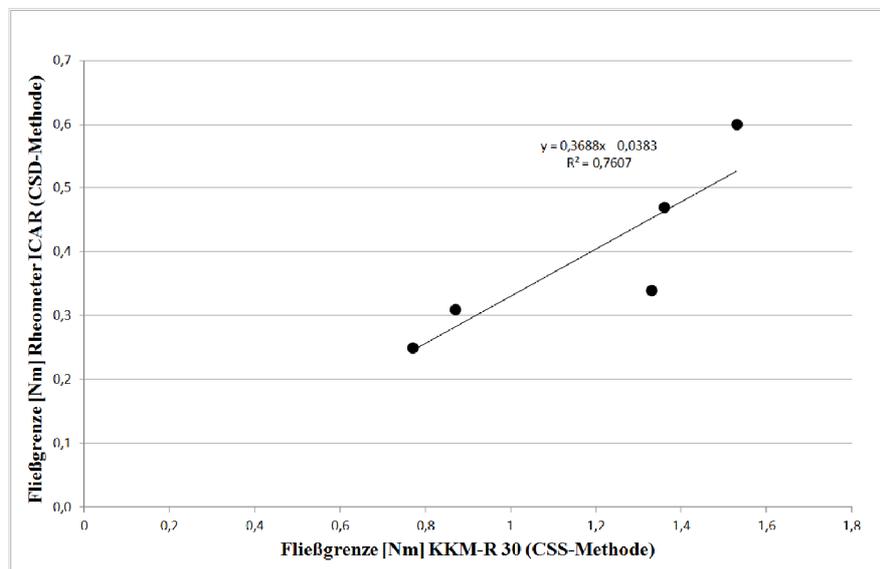


Bild 7.14: Fließgrenzen [Nm] des Rheometers ICAR aus dem Stress-Growth-Test und Fließgrenzen [Nm] (CSS-Methode) des KKM-R 30 nach Abzug der Maschinenverluste für fünf Mischversuche

### 7.2.2 KKM-R 30 und LCPC Box

Die plastische Viskosität im KKM-R 30 wird unter nahezu stationären Bedingungen bestimmt, während die Messung in der LCPC Box unter instationären Bedingungen erfolgt. Das Korrelationsdiagramm in Bild 7.15 belegt durch ein Bestimmtheitsmaß von 0,89 dennoch eine hohe Übereinstimmung zwischen der  $T_{700}$ -Zeit der LCPC Box und der Energiemenge, die während der Messung der Fließkurve im KKM-R 30 benötigt wurde (siehe Bild 7.5).

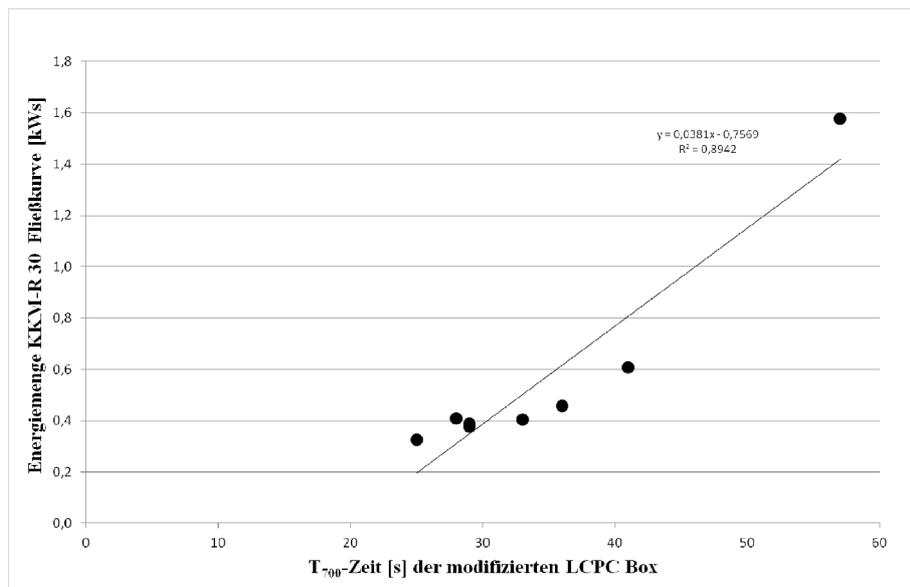


Bild 7.15: Korrelationsdiagramm für die Energiemenge in kWs während der Messung der Fließkurve im KKM-R 30 und der  $T_{700}$ -Zeit in der modifizierten LCPC Box für acht Mischversuche

### 7.2.3 Rheometer ICAR RHM-3000 und LCPC Box

Die plastische Viskosität im Rheometer wird - wie im KKM-R 30 - unter nahezu stationären Bedingungen bestimmt, während die Messung in der LCPC Box unter instationären Bedingungen erfolgt. Trotz unterschiedlicher Randbedingungen korrelieren die plastischen Viskositäten des ICAR Rheometers [Pa·s] mit den  $T_{700}$ -Zeiten [s] der LCPC Box mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,91 (Bild 7.16).

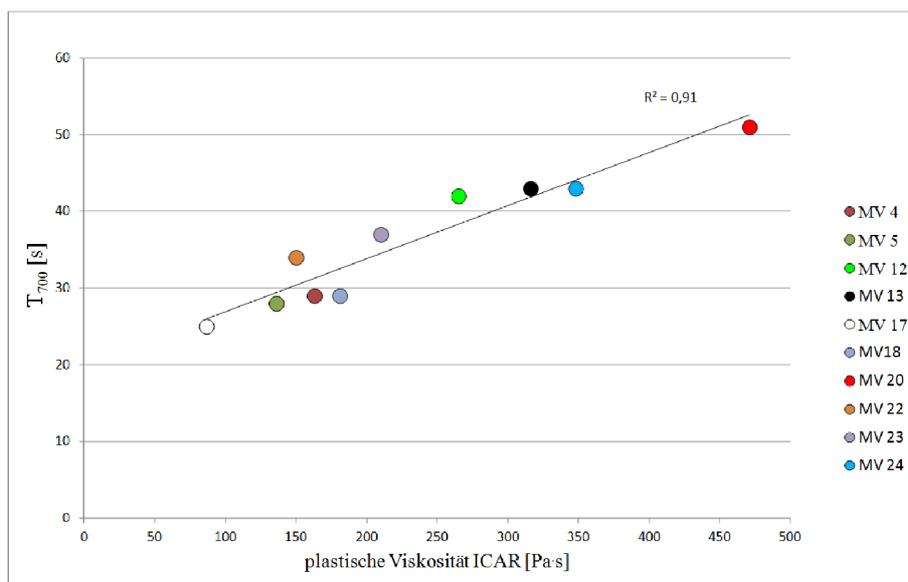


Bild 7.16: Korrelationsdiagramm für die  $T_{700}$ -Zeiten (modifizierte LCPC-Box) und die berechneten plastischen Viskositäten des ICAR-Rheometers für zehn Mischversuche

### 7.3 Festigkeitsentwicklung und Erstarrungsverhalten

#### 7.3.1 Bestimmung des Erstarrungsendes (BEUS)

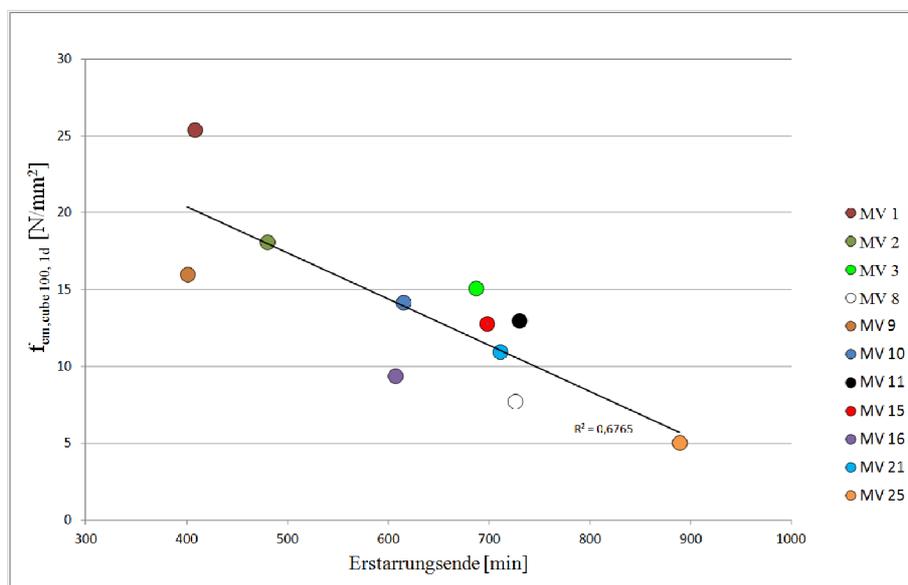


Bild 7.17: Würfel-Druckfestigkeiten  $f_{cm,cube 100, 1d}$  in [N/mm<sup>2</sup>] und das mit BEUS gemessene Erstarrungsende in [min]; MV 1 mit einem CEM I 52,5 R wurde bei der Berechnung der Regressionsgeraden nicht berücksichtigt

Das mit BEUS gemessene Erstarrungsende beeinflusst die 1d-Würfel-Druckfestigkeit  $f_{cm, cube 100, 1d}$  maßgeblich (Bild 7.17). Das Bestimmtheitsmaß von  $r^2 = 0,67$  belegt jedoch, dass weitere Faktoren auf die Entwicklung der Frühfestigkeit einwirken.

Der aufgezeigte Einfluss des Mischregimes auf die Rheologie ist auf eine veränderte Interaktion des Fließmittels mit den Bindemitteln zurückzuführen. Wie in Kapitel 2.2.6 angeführt, beeinflusst das in der Porenlösung enthaltene Fließmittel die Keimbildung, die Art und das Wachstum der Hydratationsprodukte. Nach [60] spielt der Hydratationsgrad in Gegenwart von PCE-Fließmitteln bei Leimen eine untergeordnete Rolle für die 28 Tage-Festigkeit. Vielmehr ist die dispergierende Wirkung des Fließmittels und somit die Struktur des Zementleims bedeutsam. Fließmittel beeinflussen die Ausbildung der festigkeitsbildenden Hydratphasen (C-S-H Phasen). Eine Abhängigkeit der Frühfestigkeit vom Mischregime (Fließmittel-Bindemittel-Interaktion) ist folglich naheliegend. Der in Bild 7.19 aufgezeigte Einfluss des Mischregimes auf die Entwicklung der Würfel-Druckfestigkeit bis zum Betonalter von 90 Tagen, bestätigt diese Annahme.

### 7.3.2 1-Tages-Würfeldruckfestigkeiten

Der im Mischversuch MV 1 eingesetzte CEM I 52,5 R führte bei den untersuchten HVFA-Mischungen zur höchsten 1 Tages-Würfeldruckfestigkeit von 25,4 N/mm<sup>2</sup>. Durch die Verwendung eines CEM I 52,5 N sanken die 1 Tages-Würfeldruckfestigkeiten in den übrigen Versuchen auf maximal 18,1 N/mm<sup>2</sup>.

Als förderlich für die Frühfestigkeit erwiesen sich ein hoher spezifischer Mischenergieeintrag in Kombination mit geringer Werkzeugdrehzahl, langer Mischdauer und vollständiger Zugabe des Fließmittels mit dem Anmachwasser. Da die zweistufig hergestellten Betone bei einer Fließmittelmenge von 6 kg/m<sup>3</sup> zur Entmischung neigten, konnte die Fließmittelmenge auf 4,5 kg/m<sup>3</sup> abgesenkt werden. Dadurch konnten die 1-Tages-Würfeldruckfestigkeiten von Betonen aus zweistufigen Mischregimen mit verringertem spezifischen Mischenergieeintrag, hoher Werkzeugdrehzahl und kurzer Mischdauer auf ein praxistaugliches Niveau gebracht werden (MV 18 und MV 23).

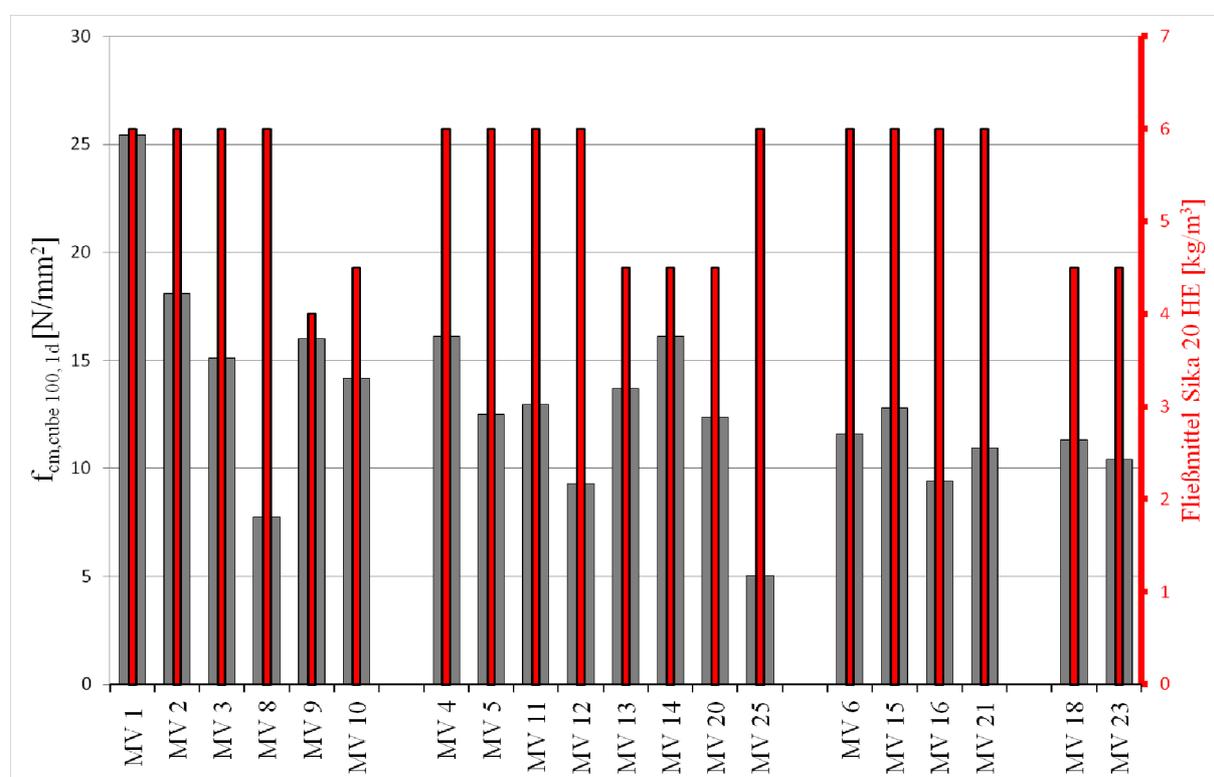


Bild 7.18: Würfel-Druckfestigkeiten  $f_{cm,cube 100,1d}$  der HVFA-Betone in [N/mm<sup>2</sup>], in Abhängigkeit vom Mischregime und der Fließmittelmenge in kg/m<sup>3</sup> Beton

### 7.3.3 Festigkeitsentwicklung

In Bild 7.19 ist die Festigkeitsentwicklung der Betone aus den Mischversuchen bis zum Betonalter von 90 Tagen dargestellt.

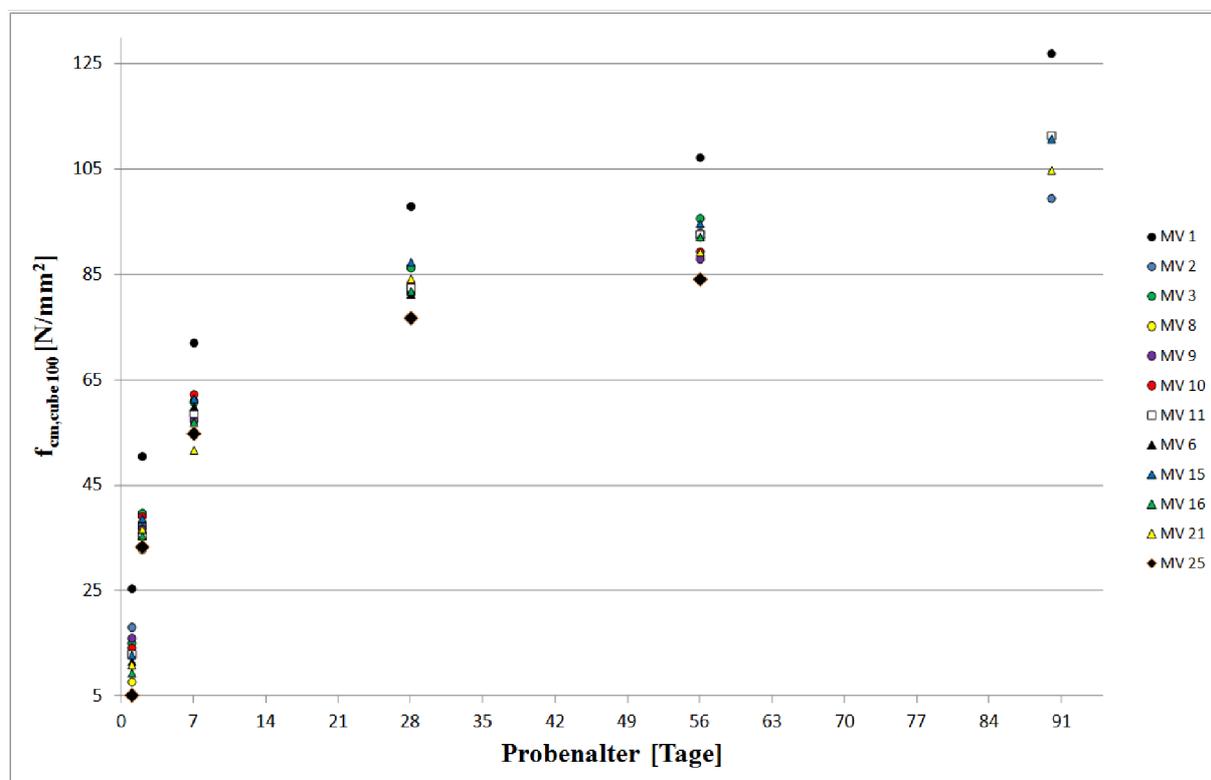


Bild 7.19: Entwicklung der Würfel-Druckfestigkeiten  $f_{cm,cube 100}$  bis zum Betonalter von 90 Tagen

Die Differenz zwischen der minimalen und maximalen Würfeldruckfestigkeit ist in Tabelle 7.2 für fünf Betonalter angegeben. Unter der Annahme, dass die gemessenen Würfeldruckfestigkeiten  $f_{c,cube 100}$  eine Stichprobe, gezogen aus einer Grundgesamtheit darstellen, betrug die Standardabweichung für die einzelnen Mischversuche maximal  $2,4 \text{ N/mm}^2$ . Die nach DIN EN 12350-7 gemessenen Luftporengehalte streuten nur minimal um einen Wert von 1,2 Volumen-Prozent. Folglich muss der überwiegende Anteil der Differenzen auf die unterschiedlichen Mischregime, und dadurch bedingte Veränderungen im Hydratationsablauf (Kapitel 2.2.6), zurückgeführt werden.

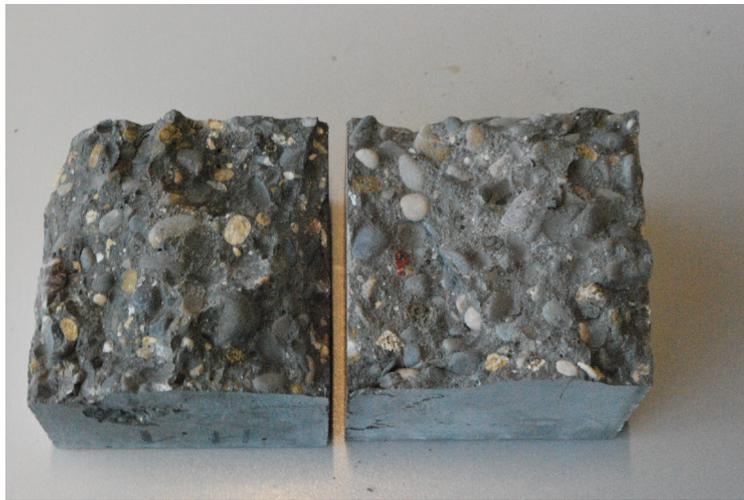
	1d	2d	7d	28d	56d
maximale Würfeldruckfestigkeit $f_{cm,cube 100}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	18,10	39,78	62,30	87,40	94,77
minimale Würfeldruckfestigkeit $f_{cm,cube 100}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	5,19	33,33	51,66	76,80	84,16
Differenz [N/mm <sup>2</sup> ]	12,91	6,45	10,64	10,60	10,61

Tabelle 7.2: Differenzen aus der minimalen und maximalen Würfeldruckfestigkeit  $f_{cm,cube 100}$  der Mischversuche MV 2 bis MV 25 für unterschiedliche Betonalter

In [33] wird die Erhöhung der Partikelpackungsdichte von Zementleim mit der Verdrängung von Luftporen durch Fließmittel mit entschäumender Wirkung erklärt. Zudem kann überschüssiges Porenwasser an der Probenoberfläche freigesetzt werden.

Die in der vorliegenden Arbeit hergestellten HVFA-Betone mit hohem Mischenergieeintrag bei geringer Werkzeuggeschwindigkeit und hohem Fließmittelgehalt neigten zur Entmischung und Freisetzung von Wasser an der Probenoberfläche. Der effektive Wasserbindemittelwert wurde bei diesen Betonen mit sehr langer Mischzeit somit vermindert und beeinflusste die Entwicklung der Druckfestigkeit positiv.

Bei den Mischversuchen MV 1 bis MV 24 dominierte der Kornbruch das Bruchbild. Bei den Probekörpern aus dem Mischversuch MV 25 wurde abweichend ein Haftungsverlust zwischen Matrix und Gesteinskörnung beobachtet (Bild 7.20).



*Bild 7.20: Probekörper aus dem Mischversuch MV 4, nach der Messung der Würfeldruckfestigkeit im Betonalter von 56 Tagen (links) und Probekörper aus dem Mischversuch MV 25 mit zweistufigem Mischregime (1. Stufe im Suspensions-Mischer, 2. Stufe in Einwellen-Mischer ELBA), nach Messung der Würfeldruckfestigkeit im Betonalter von 56 Tagen (rechts)*

### **7.4 Rheometrische Mischprozessführung**

Durch die Bestimmung der Fließgrenze und der Fließkurve nach Kapitel 6.2 liegen die rheologischen Eigenschaften für jede Einzelcharge unmittelbar nach Mischende vor. Durch zweistufige Mischregime mit zweistufiger Zugabe des Fließmittels wird zudem erreicht, dass sich die rheologischen Eigenschaften des Betons nach Mischende nur noch geringfügig ändern. Liegen die bestimmten Messwerte außerhalb eines festgelegten Akzeptanzbereichs, sind gezielte Eingriffe erforderlich. In Bild 7.21 liegt die für den Beton aus dem Mischversuch im CSS-Modus gemessene Fließgrenze außerhalb des fiktiven Akzeptanzbereichs und kann durch Nachdosierung von Fließmittel abgesenkt werden.

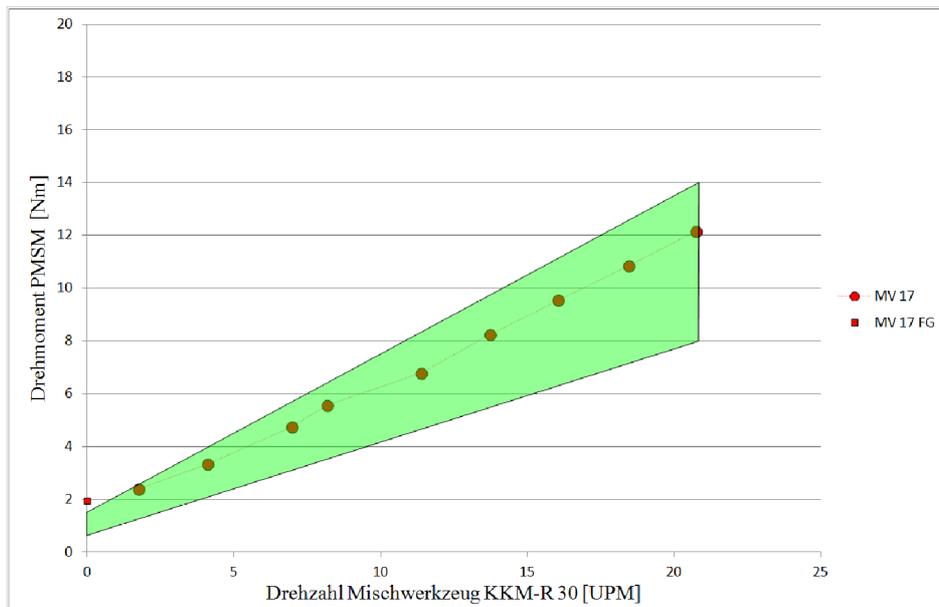


Bild 7.21: Fließgrenze für den Beton im Mischversuch MV 17 ermittelt im KKM-R 30 im CSS-Modus (Nettowert ohne Maschinenverluste), Fließkurve für den Beton MV 17 ermittelt im KKM-R 30 im CSD-Modus (Nettowerte ohne Maschinenverluste) und ein fiktiver Akzeptanzbereich für die Fließgrenze und die Fließkurve

Die Fließkurve für den Beton aus dem Mischversuch MV 5 (Bild 7.22) verläuft außerhalb des fiktiven Akzeptanzbereichs.

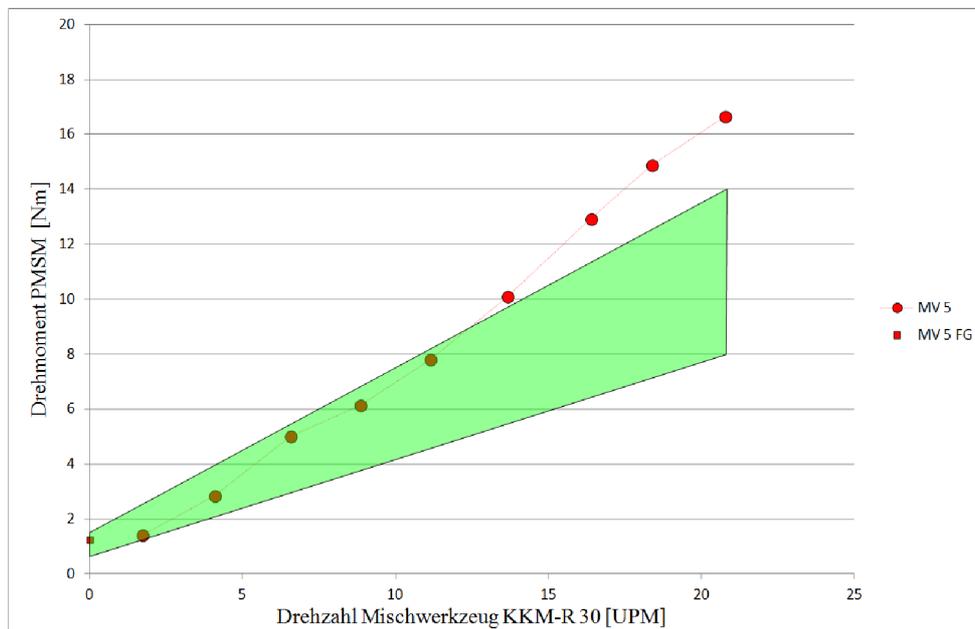


Bild 7.22: Fließgrenze für den Beton im Mischversuch MV 5 ermittelt im KKM-R 30 im CSS-Modus (Nettowert ohne Maschinenverluste), Fließkurve für den Beton MV 5 ermittelt im KKM-R 30 im CSD-Modus (Nettowerte ohne Maschinenverluste) und ein fiktiver Akzeptanzbereich für die Fließgrenze und die Fließkurve

WALLEVIK [53] beschreibt eine vektorielle Kombination von verschiedenen Maßnahmen, um die rheologischen Eigenschaften gezielt zu beeinflussen (Bild 7.23).

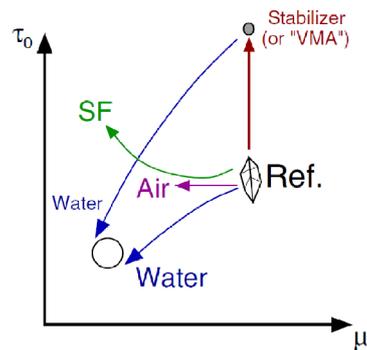


Bild 7.23: Beeinflussung der rheologischen Eigenschaften durch vektorielle Kombination verschiedener Maßnahmen [53]

Durch Wasserzugabe reduziert sich die in Bild 7.22 dargestellte Steigung der Fließkurve auf Werte innerhalb des Akzeptanzbereichs. Der Absenkung der Fließgrenze durch die Zugabe von Wasser kann mit Stabilisatoren gegengesteuert werden.

Um die rheologischen Eigenschaften der einzelnen Charge gezielt beeinflussen zu können, ist es erforderlich, die Auswirkungen der Zugabe einzelner Ausgangsstoffe bzw. von Zusatzmitteln auf die Rheologie des Betons und dessen Festigkeitsentwicklung zu kennen. Zunächst wurde der HVFA-Beton gemäß Mischregime MV 23 hergestellt und im KKM-R rheologisch charakterisiert. Die Zusatzmittel/Zusatzstoffe wurden anschließend einzeln untergemischt und die rheologischen Parameter des Betons erneut bestimmt. Die Differenzen zur jeweiligen Vorstufe wurden berechnet und sind in den Bildern 7.24 bis 7.26 dargestellt.

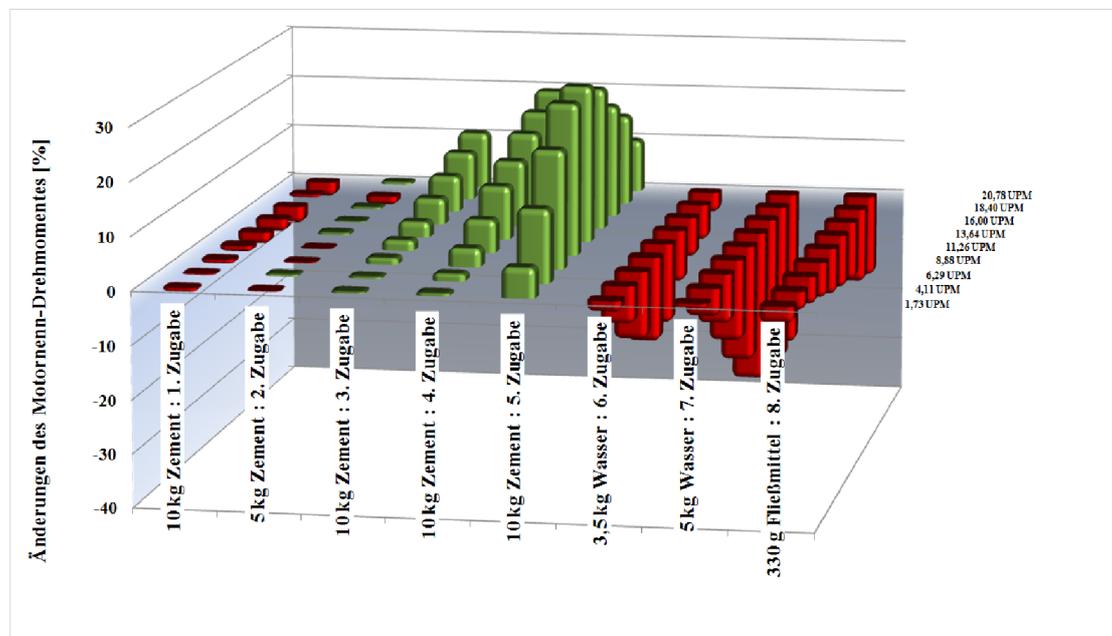


Bild 7.24: Ausgangssituation: HVFA-Beton gemäß Mischregime MV 23; in acht Einzelschritten wurden Zement, Wasser und Fließmittel untergemischt und anschließend die rheologischen Parameter des Betons mit dem KKM-R 30 bestimmt; dargestellt sind die Differenzen zur jeweiligen Vorstufe

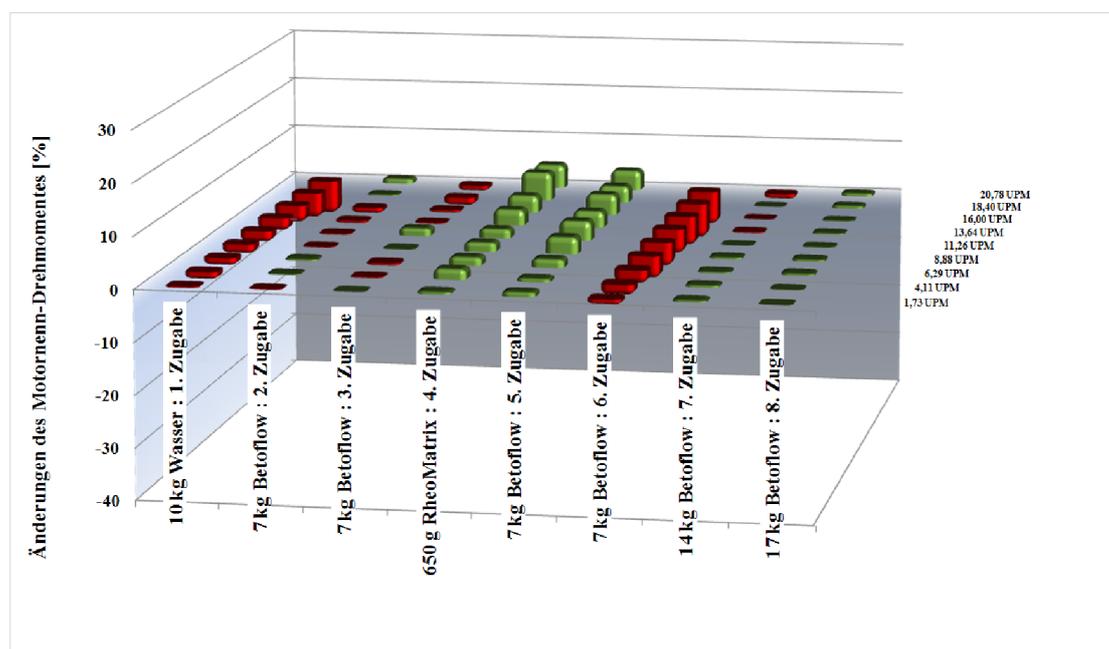


Bild 7.25: Ausgangssituation: HVFA-Beton gemäß Mischregime MV 23; in acht Einzelschritten wurden Wasser, Feinkalksteinmehl Omya Betoflow und der Stabilisierer BASF RheoMatrix 100 untergemischt und anschließend die rheologischen Parameter des Betons mit dem KKM-R 30 bestimmt; dargestellt sind die Differenzen zur jeweiligen Vorstufe

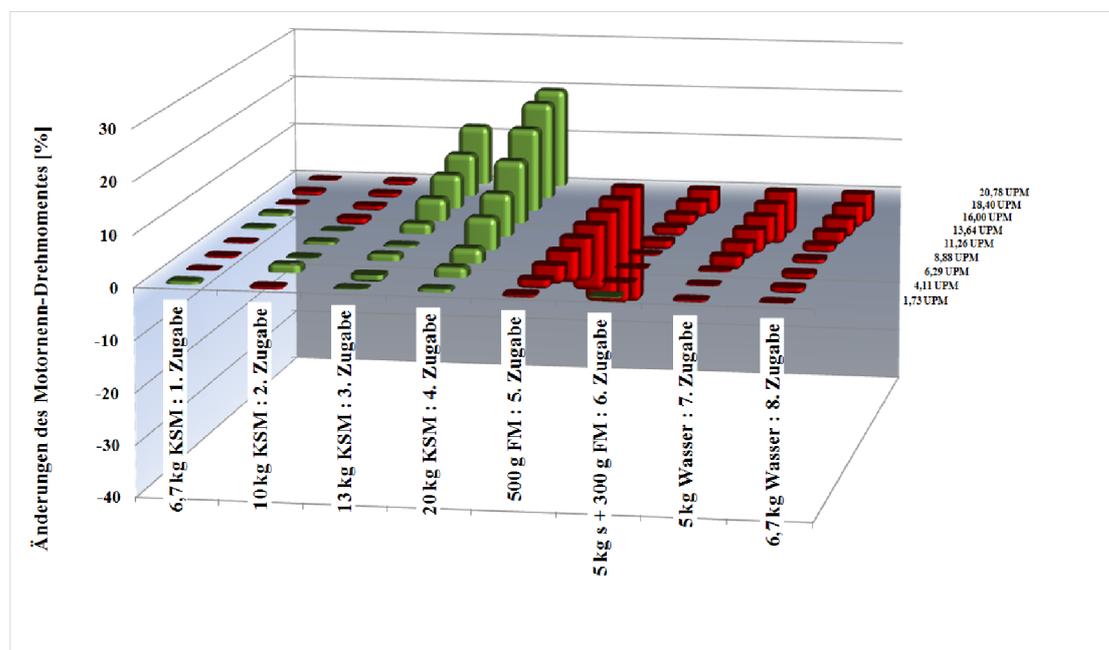


Bild 7.26: Ausgangssituation: HVFA-Beton gemäß Mischregime MV 23; in acht Einzelschritten wurden Kalksteinmehl, Fließmittel, Silika und Wasser untergemischt und anschließend die rheologischen Parameter des Betons mit dem KKM-R 30 bestimmt; dargestellt sind die Differenzen zur jeweiligen Vorstufe

Liegen diese Informationen - wie in Tabelle 7.3 in allgemeiner Form dargestellt - vor, kann die Rheologie der Einzel-Charge unter Wahrung der mechanischen Eigenschaften des Festbetons korrigiert werden. Gegebenenfalls ist dies durch die von Wallevik vorgeschlagene vektorielle Kombination von Maßnahmen zu erreichen.

	<b>Fließgrenze</b>	<b>Viskosität</b>	<b>Einfluss auf Festigkeit</b>
Zement	+	+	+
Flugasche	-	-	o
Mikrosilika	+ (-)	+ (-)	+
Kalksteinmehl	+	+	o (+)
Feinst-Kalksteinmehl z.B. Betoflow	+ (-)	+ (-)	o (+)
steigender w/z-Wert	-	-	-
Fließmittel	-	o (-)	o (+)
Stabilisierer	+	o	o
Luftporenbildner	o	-	-

*Tabelle 7.3: Einfluss nachträglich einem HVFA-Beton zugegebener Zusatzmittel bzw. Zusatzstoffe auf die Fließgrenze, die Viskosität des Frischbetons und die Festigkeit des Festbetons*

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

### 8.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit konnte aufgezeigt werden, dass zweistufige Mischregime in einem Intensiv-Konus-Mischer für den untersuchten HVFA-Beton vorteilhaft sind. Die Software BétonLAB Pro prognostizierte bereits für einen Standard-Mischer kürzere Mischzeiten für zweistufige Mischregime. In einem Intensiv-Mischer kann die Gesamtmischdauer durch Anhebung der Werkzeuggeschwindigkeit in der ersten Stufe deutlich verkürzt werden. Dabei wird in der ersten Stufe zunächst der Mörtel hergestellt. Die hohe Werkzeuggeschwindigkeit und Maschinen-Froude-Zahl des umgestalteten inneren Mischwerkzeugs werden für die intensive Deagglomeration und die schnelle Feinverteilung der Fließmittel-Moleküle benötigt, da keine grobe Gesteinskörnung vorhanden ist, die als Mahlhilfe fungiert. Eine intensive Deagglomeration in Gegenwart grober Gesteinskörnung würde bei hohen Werkzeuggeschwindigkeiten den Partikel-Abrieb forcieren und somit die Partikeloberfläche vergrößern. Bei konstanter Fließmittelmenge führt dies zu verschlechterten Frischbetoneigenschaften. In einem zweiten Schritt erfolgt das Untermischen der groben Gesteinskörnung in den Mörtel. Das Mischgut wird bei geringer Werkzeuggeschwindigkeit vom inneren Mischwerkzeug vollständig erfasst und durch die Ausgestaltung des Mischwerkzeugs vertikal transportiert (Grobvermischung). Aufgrund der geringen Werkzeuggeschwindigkeit wird der unerwünschte Partikelabrieb durch die grobe Gesteinskörnung minimiert.

Durch zweistufige Mischregime können die plastische Viskosität, die Mischdauer und der erforderliche Mischenergieeintrag deutlich reduziert werden. Da sich die rheologischen Eigenschaften nach Mischende kaum ändern, ist der deutlich verminderte Mischenergieeintrag bei zweistufigen Mischregimen ausreichend.

Um die rheologischen Parameter jeder Einzelcharge im Mischer bewerten zu können, wurde der Antrieb des inneren Mischwerkzeugs sowie die Steuerung der Mischanlage gegenüber dem Seriengerät abgewandelt. Durch den Einsatz eines Direktantriebs konnte die Anzahl der verbauten Komponenten reduziert und der Leistungsumfang erhöht werden. Der nach dem Direct-Torque-Verfahren arbeitende Frequenzumrichter ermöglicht im Zusammenspiel mit dem Direktantrieb den drehzahl- und drehmomentgeführten Betrieb bei höchster Genauigkeit. Neben dem Betrieb als Mischer besteht die Möglichkeit, das innere Mischwerkzeug aus Drehzahl null kontrolliert zu beschleunigen und bei geringsten Drehzahlen zu betreiben. Damit konnten die aus der Rheometrie bekannten Verfahren zur Bestimmung rheologischer Parameter in relativen Einheiten umgesetzt werden.

Vergleichende Messungen mit einem Beton-Rheometer und der modifizierten LCPC Box belegen die Eignung des gewählten Aufbaus zur Bestimmung rheologischer Parameter im Mischer. Sind die Einflüsse der ergänzenden Zugabe von Zusatzmitteln und/oder von Zusatzstoffen auf die Rheologie des Frischbetons und auf die mechanischen Eigenschaften des Festbetons bekannt, kann dies für eine rheologische Mischprozessführung genutzt werden. Liegen die Messwerte einer Einzelcharge außerhalb eines Akzeptanzbereichs, kann die Rheologie durch Nachdosierung einzelner Zusatzmittel/Zusatzstoffe oder von Kombinationen daraus, gezielt beeinflusst werden.

Den unvermeidlichen Fluktuationen der Eigenschaften der Ausgangsstoffe kann so automatisiert begegnet werden.

### **8.2 *Ausblick***

#### **8.2.1 Weitere Verbesserungen der Mischtechnik**

Die Konstruktion des Labormischers KKM-R 30 erfolgte als 3D-CAD-Modell. Darauf aufbauend, kann mit der Software SolidWorks der Grundgedanke des Computer Integrated Manufacturing aufgegriffen werden. Das integrierte Finite-Elemente-Modul (FEM) erlaubt die effektive Prüfung auf Festigkeit und Sicherheit direkt an einzelnen Teilkonstruktionen im Produktentwicklungsprozess. Das CFD-Modul (Computational Fluid Dynamics) ermöglicht die Simulation der Strömung des Mörtels unter realen Bedingungen. Durch Was-wäre-wenn Szenarien lassen sich die Auswirkungen von Suspensions-Strömungen auf umgebende Komponenten bewerten. Für zweistufige Mischregime lässt sich das Untermischen der groben Gesteinskörnung in der zweiten Mischstufe in den sehr fließfähigen Mörtel aus der ersten Stufe simulieren. Die Ausbildung des Abstreifers kann auf diese Aufgabe hin optimiert werden und somit die Mischdauer für diesen Teilschritt weiter reduziert werden. Die während des Mischvorgangs hoch beanspruchten Bereiche des inneren Mischwerkzeugs können durch die Strömungssimulation bestimmt werden und gezielt durch hochpreisige Schleißschichten vor übermäßigem Verschleiß geschützt werden. Die so optimierten Bauteile können über geeignete Datenformate direkt an CNC-Anlagen (Computerized Numerical Control) übergeben und gefertigt werden.

#### **8.2.2 Weitere Verbesserungen zur Erfassung der rheologischen Parameter**

In der vorliegenden Arbeit erfolgte die Bestimmung der Fließkurve mit einem 46 Sekunden dauernden Messregime. Einer 10-sekündigen Vorscherphase folgten neun Geschwindigkeitsstufen von jeweils vier Sekunden Dauer. Da unmittelbar nach Mischende kein Strukturabbau erforderlich ist, kann die 10-sekündige Vorscherphase entfallen. Zudem ist zu prüfen, ob der gewählte Geschwindigkeitsbereich für unterschiedliche Betone geeignet ist. Gegebenenfalls kann der Geschwindigkeitsbereich und somit die Anzahl der Stufen verringert und die Dauer des Messregimes verkürzt werden.

Die Sollwert-Vorgabe der Antriebe und die Auswertung der Ist-Werte erfolgte über die Profibus-Verbindung durch die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS). Obwohl der Datenaustausch bei den Oszillationsversuchen mit einer Frequenz von 100 Hz (10 ms) erfolgte, war die Berechnung der Phasenverschiebung nur in groben Einzelstufen möglich. Um die Qualität der Auswertung zu verbessern, ohne die SPS sowie die Profibus-Verbindung stärker zu belasten, kann die Ausführung und Auswertung des Oszillations-Tests in den Frequenzumrichter ABB ACSM1 des inneren Mischwerkzeugs verlagert werden. Mit der Software DriveSPC werden anwendungsspezifische Programme nach der Norm IEC-61131 erstellt und auf dem Umrichter zur Ausführung gebracht. Die SPS startet und beendet somit nur noch das Anwenderprogramm im Frequenzumrichter und liest die Ergebnisse während der Ausführung aus. Die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der SPS sind somit auf ein Mindestmaß reduziert und werden, von in der Praxis im Einsatz befindlichen Geräten, erfüllt.

### 8.2.3 Einsatzbereich Transportbeton

Durch die Kombination aus Leim-Herstellung im Intensiv-Konus-Mischer und Fahrmischer mit Konsistenz-Steuerung werden mehrere Nachteile bei der Herstellung von Hochleistungsbeton gelöst. Der Energiebedarf bei der Herstellung des Leims liegt deutlich unterhalb einstufiger Mischregime und unterhalb der zweistufiger Mischregime. Da die Herstellung von drei Einzel-Chargen Beton durch die Herstellung einer Charge Leim ersetzt werden kann, besteht die Möglichkeit den Durchsatz der Anlage deutlich zu steigern. Gegenüber dem zweistufigen Mischregime ist allerdings die Fließmittelmenge zu erhöhen.

Die Herstellung von Beton mit einem klassischen Mischregime ist weiterhin möglich (z. B. erdfeuchte Betone für das Privatkundengeschäft). Auf die unterschiedlichen Anforderungen kann somit - mit einem Mischer - reagiert werden.

## 9 Anhang

- Tabelle 9.1 mit Beschreibung der Mischversuche MV 1 bis MV 25 gemäß Bild 6.28
- Fließkurven der Mischversuche MV 1 bis MV 23 in 10 Untergruppen (Bild 9.1 bis Bild 9.10) gemäß Bild 6.28.
- Literaturverzeichnis

## Kapitel 9 Anhang

Mischversuch [-]	Zement [Typ]	Art der Herstellung	Mischenergieeintrag [kWh/m <sup>3</sup> ]	Drehzahl 1.Stufe [UPM]	bis [kWh/m <sup>3</sup> ]	FM 1.Stufe [kg/m <sup>3</sup> ]	Drehzahl 2.Stufe [UPM]	FM 2.Stufe [kg/m <sup>3</sup> ]	Bemerkung [-]
MV 1	Holcim 52,5 R HS/NA	1-stufig: Beton	8,75	100	8,75	6	-	-	
MV 2	Heidelb. 52,5 N HS/NA	1-stufig: Beton	8,75	100	8,75	6	-	-	
MV 3	Heidelb. 52,5 N HS/NA	1-stufig: Beton	8,75	250	8,75	6	-	-	
MV 4	Heidelb. 52,5 N HS/NA	1-stufig: Beton	8,75	100	5,55	3,6	100	2,4	
MV 5	Heidelb. 52,5 N HS/NA	1-stufig: Beton	8,75	400	5,55	3,6	400	2,4	
MV 6	Heidelb. 52,5 N HS/NA	1. Stufe: Mörtel/ 2. Stufe: Beton	8,75	500	7	6	100	-	
MV 7	Heidelb. 52,5 N HS/NA	1-stufig: Beton	5,25	100	5,25	6	-	-	
MV 8	Heidelb. 52,5 N HS/NA	1-stufig: Beton	5,25	400	5,25	6	-	-	
MV 9	Heidelb. 52,5 N HS/NA	1-stufig: Beton	5,25	500	5,25	4	-	-	
MV 10	Heidelb. 52,5 N HS/NA	1-stufig: Beton	5,25	500	5,25	4,5	-	-	
MV 11	Heidelb. 52,5 N HS/NA	1-stufig: Beton	5,25	100	5,25	3,6	100	2,4	
MV 12	Heidelb. 52,5 N HS/NA	1-stufig: Beton	5,25	400	5,25	3,6	400	2,4	
MV 13	Heidelb. 52,5 N HS/NA	1-stufig: Beton	5,25	250	5,25	2,7	250	1,8	
MV 14	Heidelb. 52,5 N HS/NA	1-stufig: Beton	5,25	150	5,25	2,7	150	1,8	
MV 15	Heidelb. 52,5 N HS/NA	1. Stufe: Mörtel/ 2. Stufe: Beton	5,25	400	3,95	6	100	-	
MV 16	Heidelb. 52,5 N HS/NA	1. Stufe: Mörtel/ 2. Stufe: Beton	5,25	250	4,3	6	250	-	
MV 17	Heidelb. 52,5 N HS/NA	1. Stufe: Mörtel/ 2. Stufe: Beton	5,25	600	3,7	3,6	150	2,4	
MV 18	Heidelb. 52,5 N HS/NA	1. Stufe: Mörtel/ 2. Stufe: Beton	5,25	1000	3,7	2,7	150	-	Zugabe 1,8 kg FM nach 1,67 kWh/m <sup>3</sup>
MV 19	Heidelb. 52,5 N HS/NA	1-stufig: Beton	3,5	300	3,5	3,6	-	-	Zugabe 2,4 kg FM nach 2,1 kWh/m <sup>3</sup>
MV 20	Heidelb. 52,5 N HS/NA	1-stufig: Beton	3,5	250	3,5	2,7	-	-	
MV 21	Heidelb. 52,5 N HS/NA	1. Stufe: Mörtel/ 2. Stufe: Beton	3,5	100	2,07	6	100	-	
MV 22	Heidelb. 52,5 N HS/NA	1. Stufe: Mörtel/ 2. Stufe: Beton	3,5	600	2,1	3,6	150	-	Zugabe 2,4 kg FM nach 1,39 kWh/m <sup>3</sup>
MV 23	Heidelb. 52,5 N HS/NA	1. Stufe: Mörtel/ 2. Stufe: Beton	3,5	1000	2,3	2,7	150	-	Zugabe 1,8 kg FM nach 1,16 kWh/m <sup>3</sup>
MV 24	Heidelb. 52,5 N HS/NA	1. Stufe: Leim/ 2. Stufe: Beton im Elba	2,3	1000	2,3	3	-	-	Zugabe 1,5 kg FM nach 1,6 kWh/m <sup>3</sup>
MV 25	Heidelb. 52,5 N HS/NA	1. Stufe: Leim/ 2. Stufe: Beton im Elba	5,25	im Suspensions-Mischer 1200 UPM		6	-	-	

Tabelle 9.1: Tabelle mit Beschreibung der Mischversuche MV 1 bis MV 25 gemäß Bild 6.28

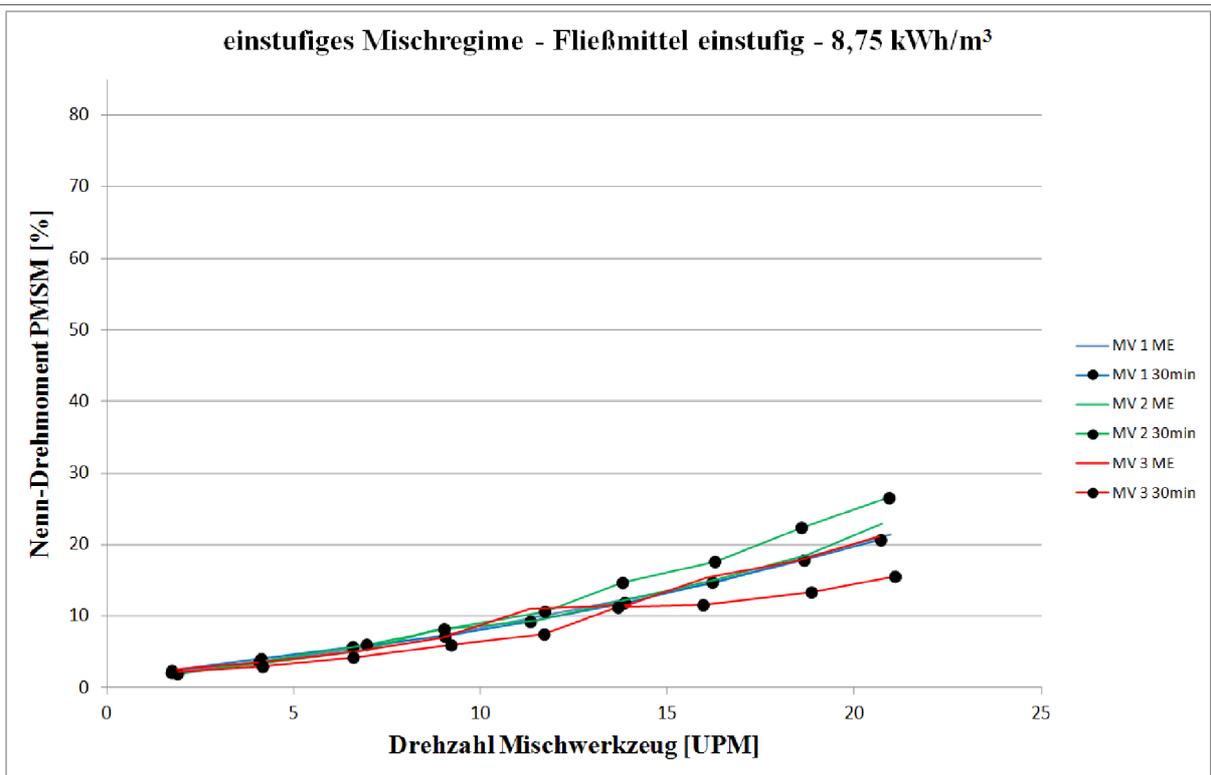


Bild 9.1: Fließkurven der HVFA-Betone mit einstufigem Mischregime und einstufiger Zugabe des Fließmittels; Mischenergieeintrag von 8,75 kWh/m<sup>3</sup> Frischbeton

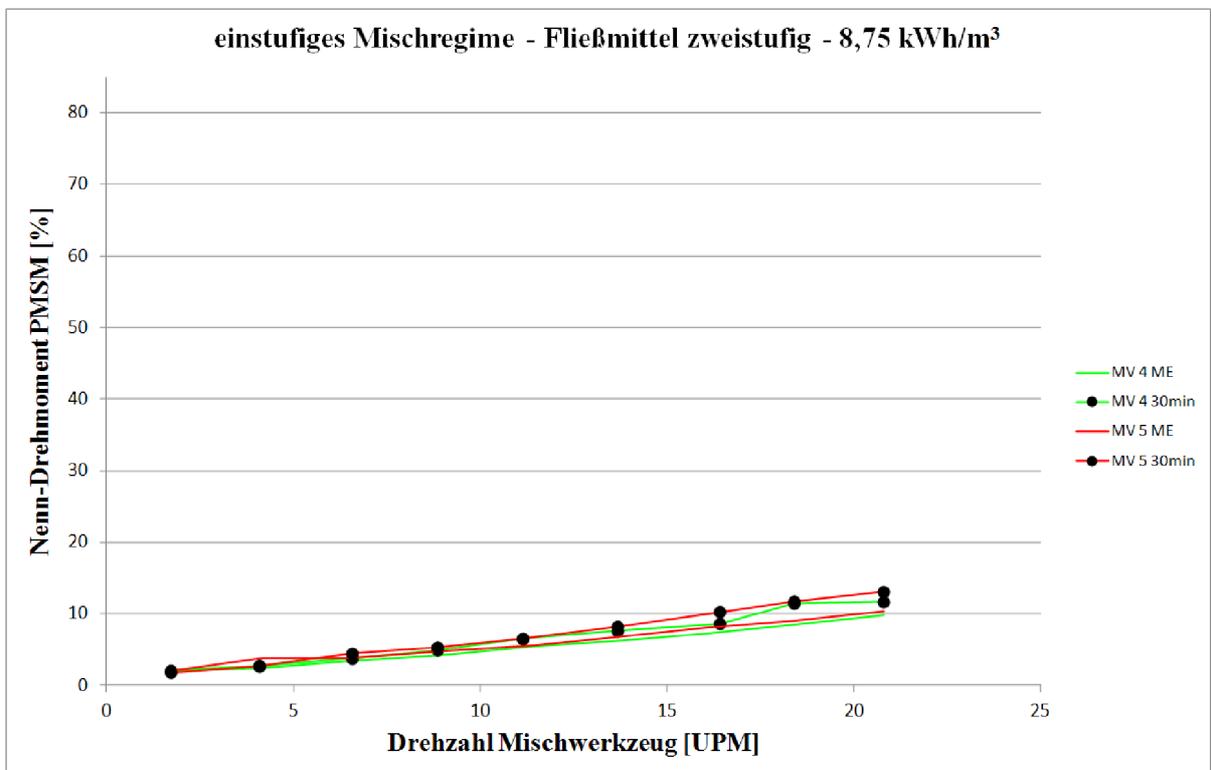


Bild 9.2: Fließkurven der HVFA-Betone mit einstufigem Mischregime und zweistufiger Zugabe des Fließmittels; Mischenergieeintrag von 8,75 kWh/m<sup>3</sup> Frischbeton

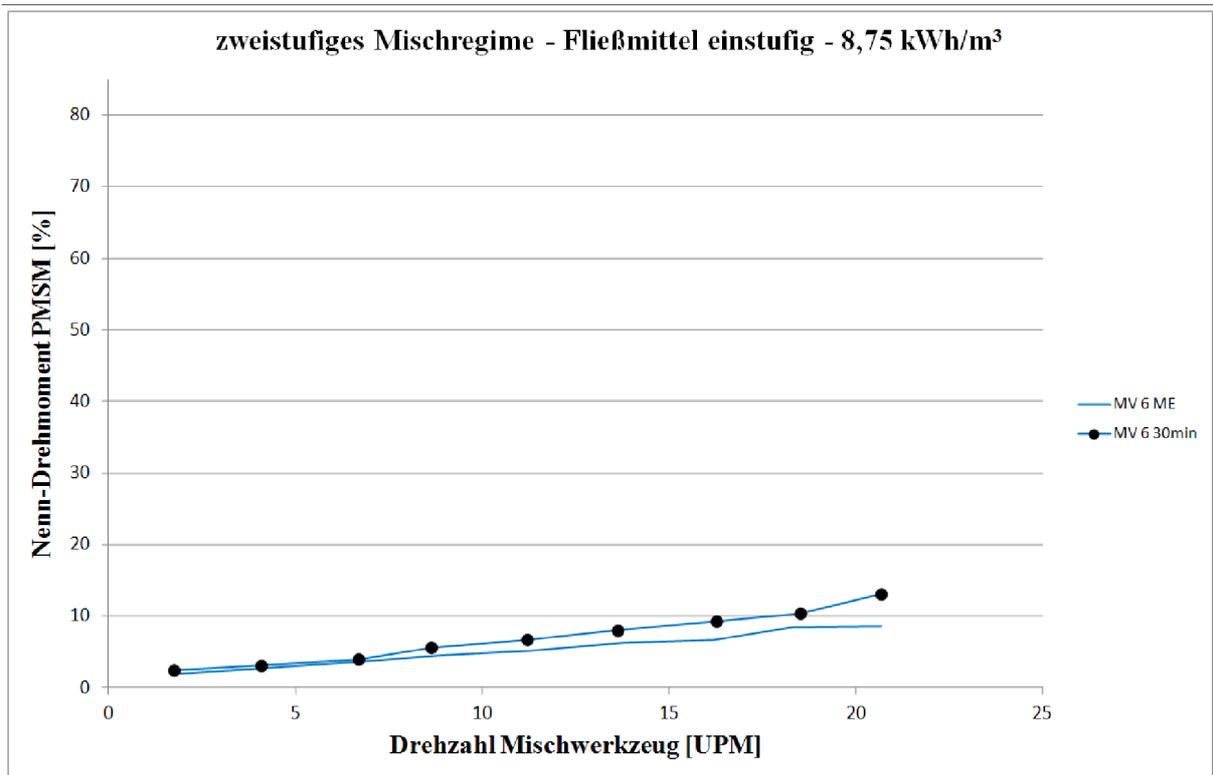


Bild 9.3: Fließkurve eines HVFA-Betons mit zweistufigem Mischregime und zweistufiger Zugabe des Fließmittels; Mischenergieeintrag von 8.75 kWh/m<sup>3</sup> Frischbeton

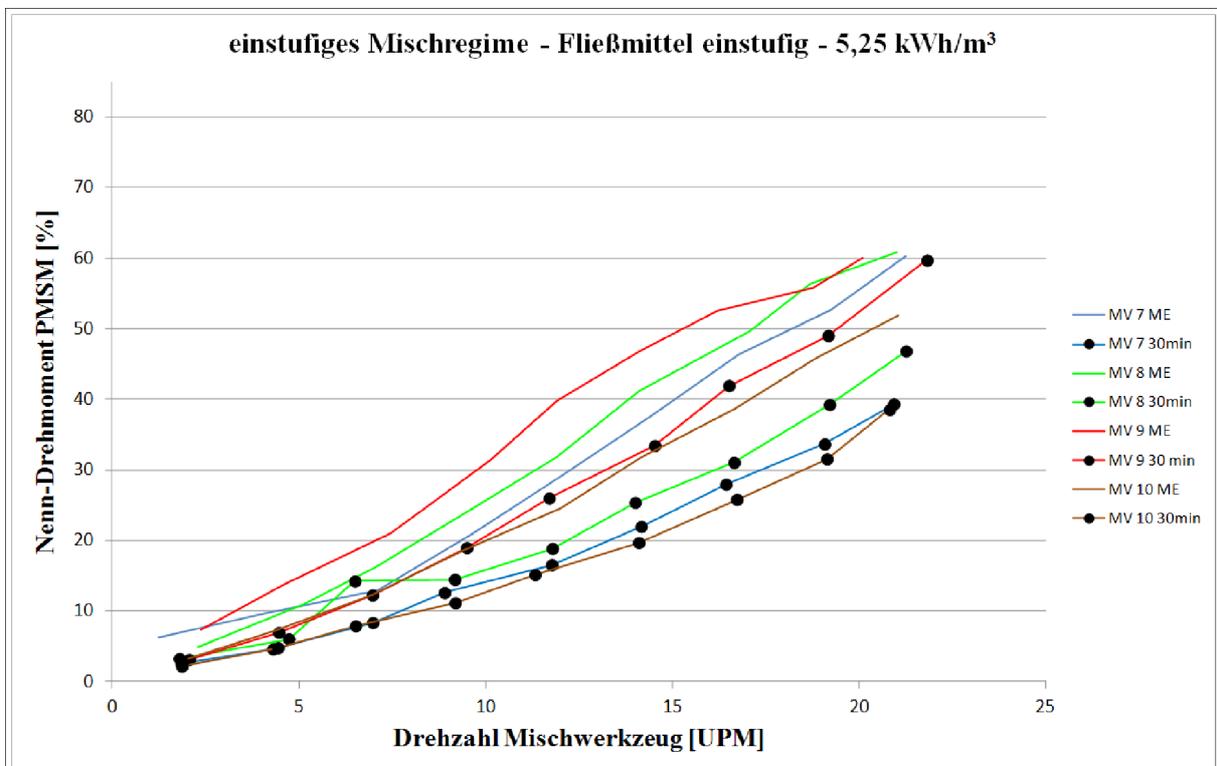


Bild 9.4: Fließkurven der HVFA-Betone mit einstufigem Mischregime und einstufiger Zugabe des Fließmittels; Mischenergieeintrag von 5,25 kWh/m<sup>3</sup> Frischbeton

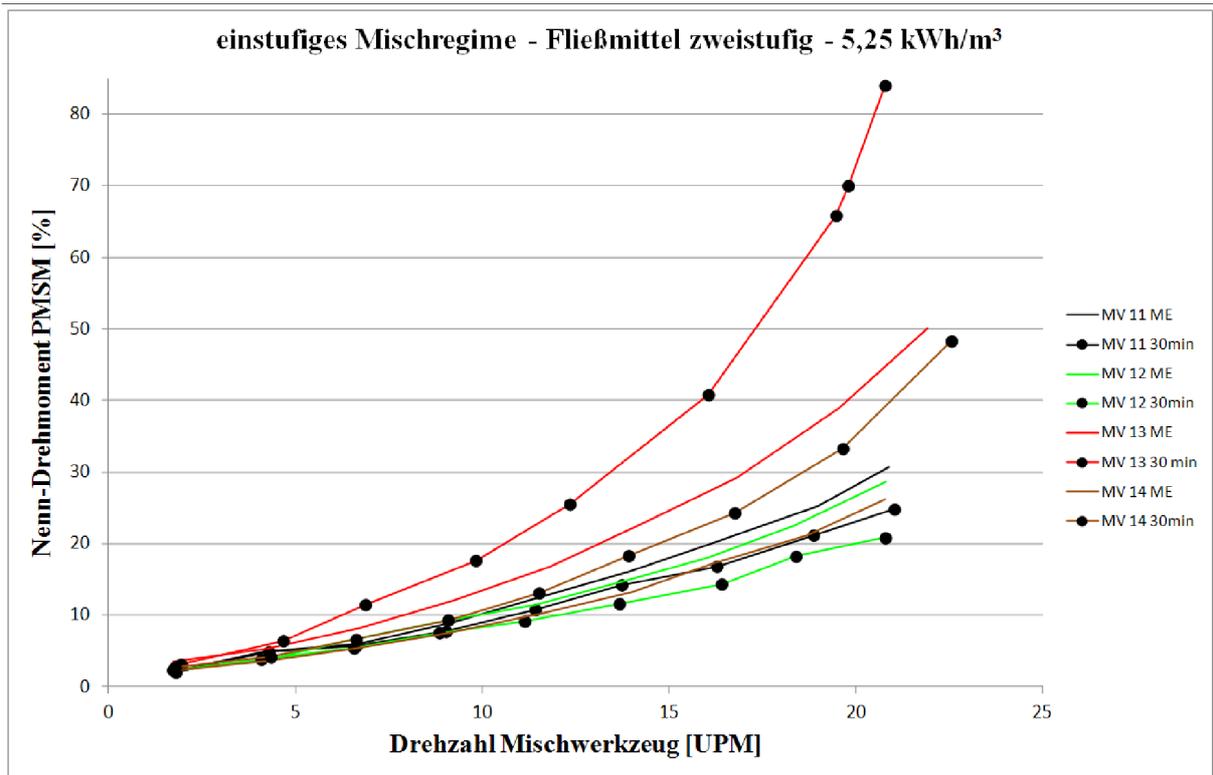


Bild 9.5: Fließkurven der HVFA-Betone mit einstufigem Mischregime und zweistufiger Zugabe des Fließmittels; Mischenergieeintrag von 5,25 kWh/m<sup>3</sup> Frischbeton

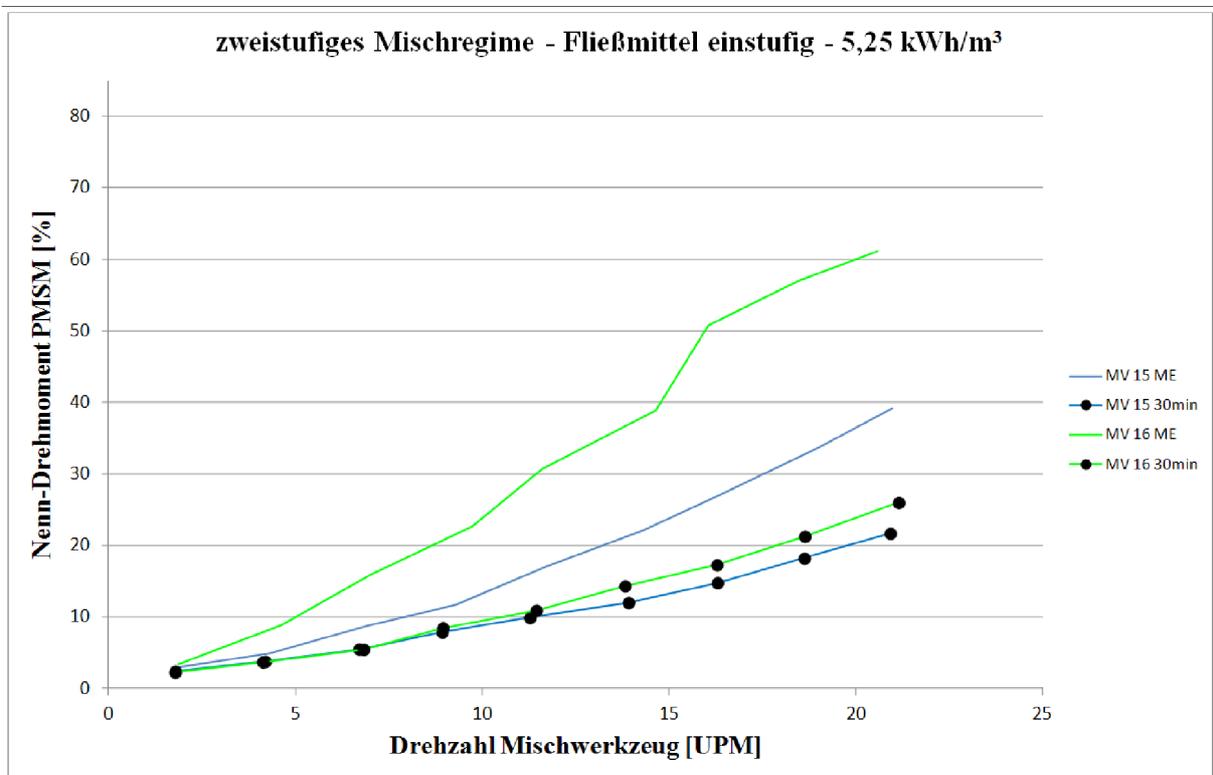


Bild 9.6: Fließkurven der HVFA-Betone mit zweistufigem Mischregime und einstufiger Zugabe des Fließmittels; Mischenergieeintrag von 5,25 kWh/m<sup>3</sup> Frischbeton

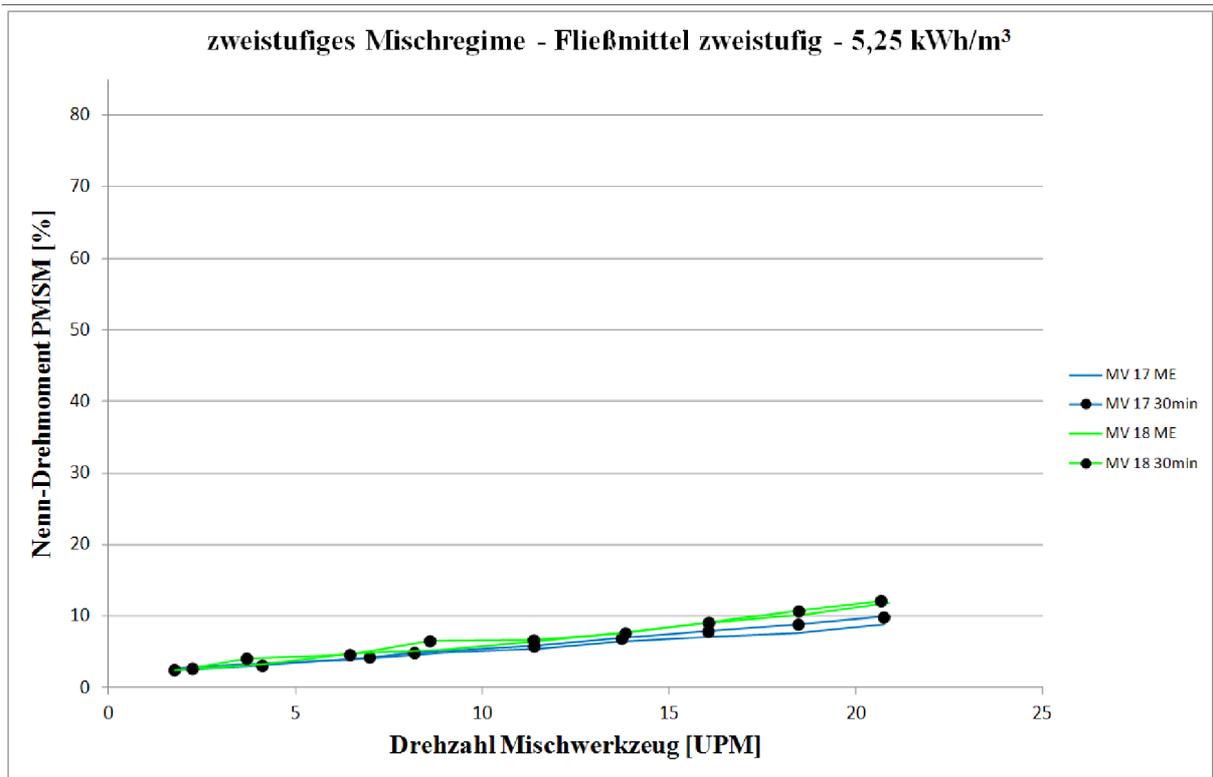


Bild 9.7: Fließkurven der HVFA-Betone mit zweistufigem Mischregime und zweistufiger Zugabe des Fließmittels; Mischenergieeintrag von 5,25 kWh/m<sup>3</sup> Frischbeton

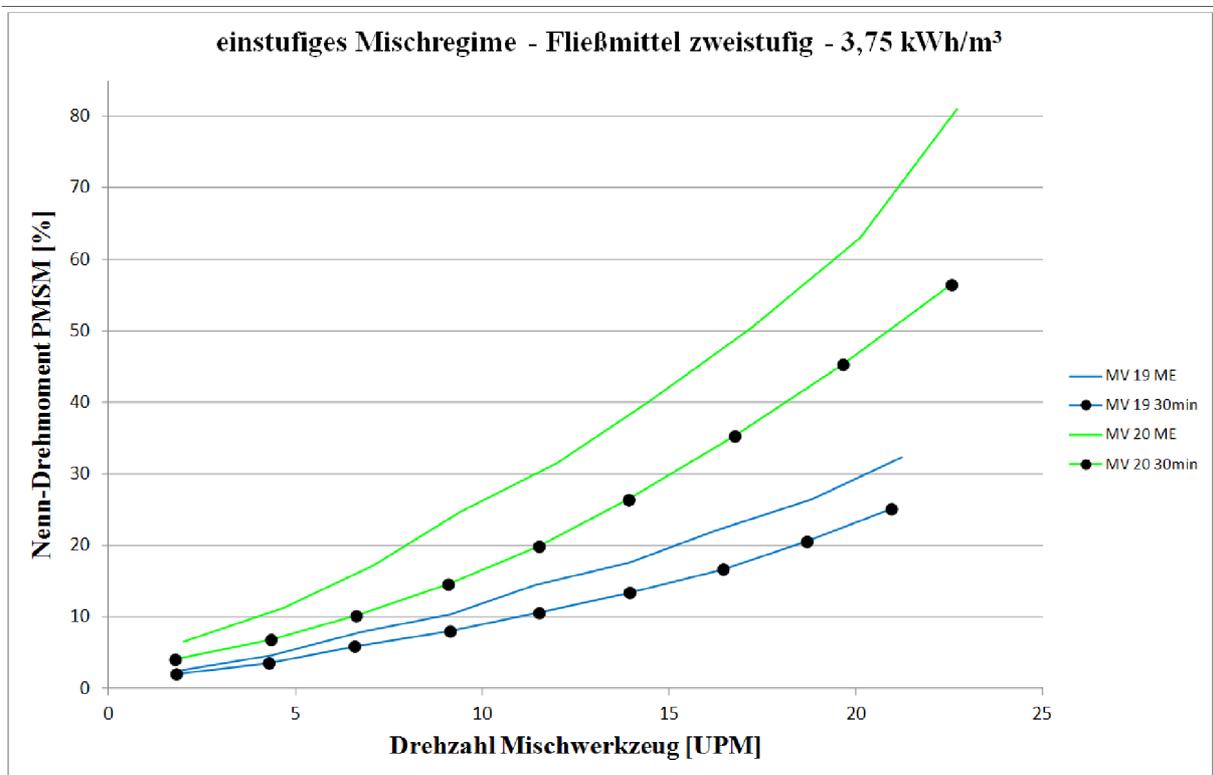


Bild 9.8: Fließkurven der HVFA-Betone mit einstufigem Mischregime und zweistufiger Zugabe des Fließmittels; Mischenergieeintrag von 3,75 kWh/m<sup>3</sup> Frischbeton

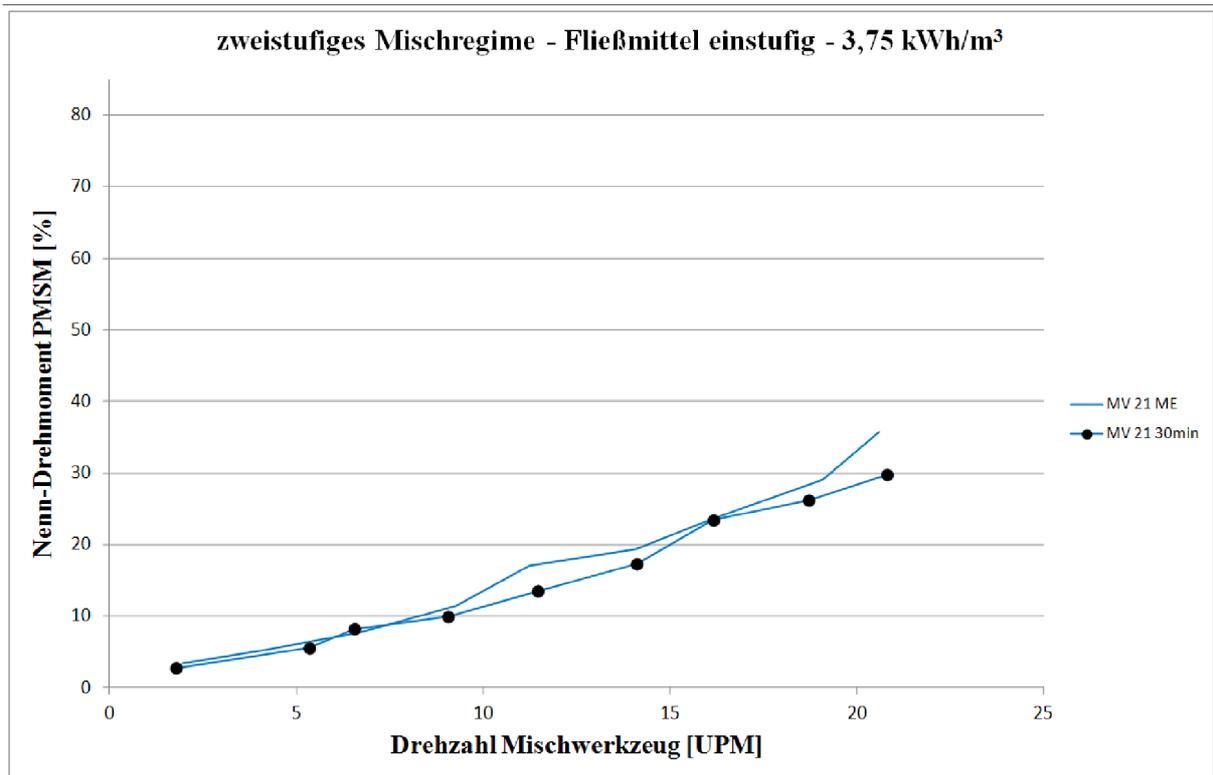


Bild 9.9: Fließkurven der HVFA-Betone mit zweistufigem Mischregime und einstufiger Zugabe des Fließmittels; Mischenergieeintrag von 3,75 kWh/m<sup>3</sup> Frischbeton

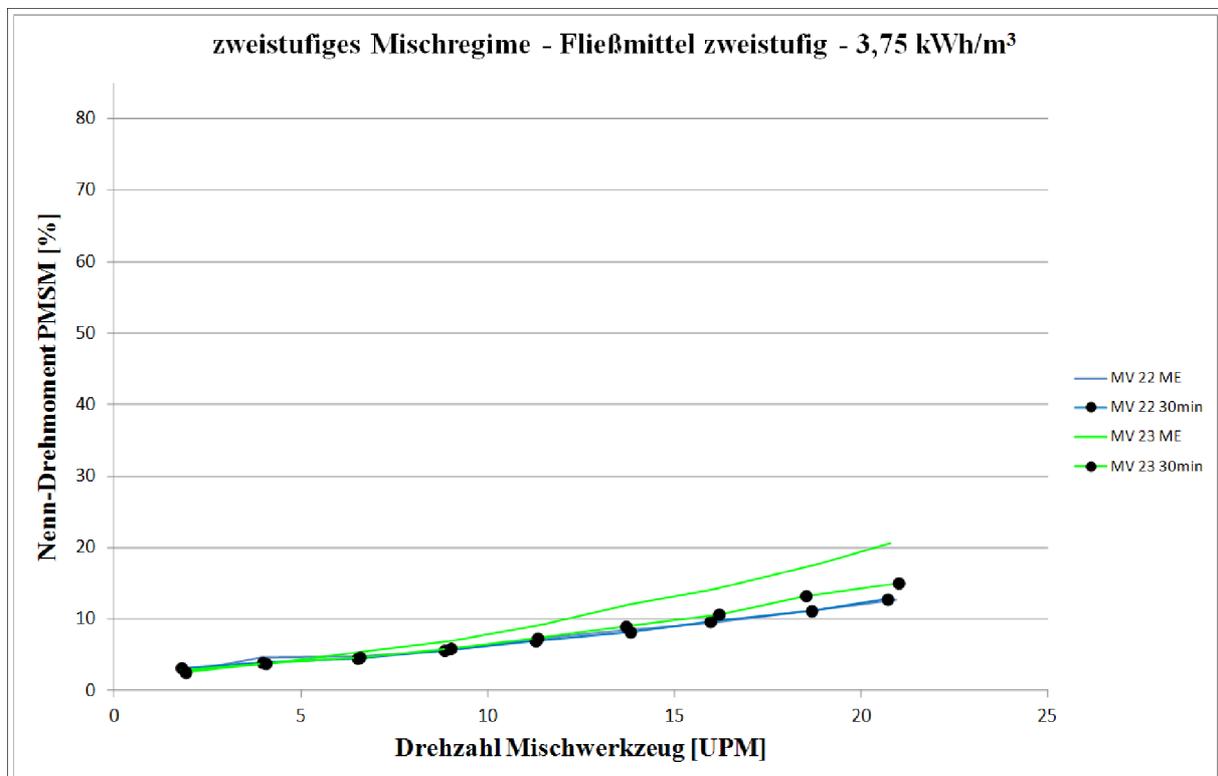


Bild 9.10: Fließkurven der HVFA-Betone mit zweistufigem Mischregime und zweistufiger Zugabe des Fließmittels; Mischenergieeintrag von 3,75 kWh/m<sup>3</sup> Frischbeton

## Literaturverzeichnis

- [01] **Cheung, J.; Jeknavorian, A. et al.:** Impact of admixtures on the hydration kinetics of Portland cement, *Cement and Concrete Research*, S. 1289-1309, 41 (12), Elsevier, 2011
- [02] **Ferraris, C.F.; de Larrard, F.; Martys, N.:** *Materials Science of Concrete VI*, Wiley, 2001, ISBN: 978-1-574-98069-1
- [03] **Scheydt, J. C.; Graf, M., Borschnek, F.; Müller, H. S.:** Entwicklung eines ultrahochfesten Betons für den Einsatz im Betonfertigteilwerk, *BWI*, S. 58-65, 1, ad-media, 2011
- [04] **Chang, P.-K.; Peng, Y.-N.:** Influence of mixing techniques on properties of high performance concrete, *Cement and Concrete Research*, S. 87-95, 31 (1), Elsevier, 2001
- [05] **Mezger, T. G.:** *Das Rheologie Handbuch*, Vincentz Network, 2010, ISBN: 978-3-866-30863-3
- [06] **Ferraris, Ch. F.:** Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, S. 461-478, 104 (5), <http://www.nist.gov/jres>, 1999
- [07] **Roussel, N.:** The LCPC Box: a cheap and simple technique for yield stress measurements of SCC, *Materials and Structures*, S. 889-896, 40 (9), Springer, 2007
- [08] **Roussel, N.; Coussot, P.:** "Fifty-cent rheometer" for yield stress measurements: From slump to spreading flow, *Journal of Rheology*, S. 705-718, 49 (3), American Institute of Physics, 2005
- [09] **Beitzel, M.:** Frischbetondruck unter Berücksichtigung der rheologischen Eigenschaften, Dissertation, TH Karlsruhe, 2009
- [10] **Banfill, P.; Beaupré, D. et. al.:** Comparison of concrete rheometers: International tests at LCPC in October, 2000, National Institute of Standards and Technology, 2000
- [11] **de Larrard, F.; Cazacliu, B.; Chopin, D.; Château, E.:** Production of SCC, 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, S. 481-494, 2003
- [12] **Weinekötter, U.; Gericke, H.:** *Mischen von Feststoffen*, Springer, 1995, ISBN: 978-3-540-58567-1
- [13] **Rwei, S.P.; Feke, D.L.; Manas-Zloczower, I.:** Observation of carbon black agglomerate dispersion in simple shear flows, *Polymer Engineering & Science*, S. 701-706, 30 (12), John Wiley & Sons, 1990
- [14] **Jézéquel, P.H.; Collin, V.:** Mixing of concrete or mortars: Dispersive aspects, *Cement and Concrete Research*, S. 1321-1333, 37 (9), Elsevier, 2007
- [15] **Powers, T.C.:** *The Properties of Fresh Concrete*, John Wiley & Sons, 1969, ISBN: 978-0-471-69590-5
- [16] **Jézéquel, P.H.; Collin, V.:** Mixing of concrete or mortars: Distributive aspects, *Cement and Concrete Research*, S. 678-686, 39 (8), Elsevier, 2009
- [17] **Daumann, B.; Anlauf, H.; Nirschl, H.:** Determination of the energy consumption during the production of various concrete recipes, *Cement and Concrete Research*, S. 590-599, 39 (7), Elsevier, 2009
- [18] **Deuse, T.; Hornung, D.; Möllmann, M.:** Von der Mikrodur- zur Nanodur-Technologie. Normzement zur praxisingerechten Herstellung von UHPC, *BFT International*, S. 4-15, 75 (5), Bauverlag BV, 2009
- [19] **Cazacliu, B.; Roquet, N.:** Concrete mixing kinetics by means of power measurement, *Cement and Concrete Research*, S. 182-194, 39 (3), Elsevier, 2009
- [20] **Tattersall, G. H.; Banfill, P. F.G.:** *The Rheology of fresh concrete*, Pitman Advanced Publishing, 1983, ISBN: 978-0-273-08558-4
- [21] **Williams, D.A.; Saak, A.W.; Jennings, H.M.:** The influence of mixing on the rheology of fresh cement paste, *Cement and Concrete Research*, S. 1491-1496, 29 (9), Elsevier, 1999
- [22] **DIN 459-2 Mischer für Beton und Mörtel Teil 2: Verfahren zur Prüfung der Mischwirkung von Betonmischern:** DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, 1995
- [23] **Beitzel, H.; Charonnat, Y.; Beitzel, M.:** RILEM TC 150-ECM Assessment and classification of performance mixers, *Materials and Structures*, S. 250-264, 36, RILEM Publications SARL, 2003
- [24] **Habermann, R.:** NOBILTA - Feststoffmischen mit hohem Energieeintrag, Teil 1, *Keramische Zeitschrift*, S. 254-259, 4, Expert Fachmedien GmbH, 2007
- [25] **Müller, M.:** Feststoffmischen, *Chemie Ingenieur Technik*, S. 1015-1023, 79 (7), Wiley-VCH, 2007
- [26] **Hoffmann, T.:** Mischen und Befeuchten von Schüttgütern, Dissertation, Universität Paderborn, 1995
- [27] **BHS-Sonthofen:** Dreidimensionales Mischen beim BHS Doppelwellen-Chargenmischer (DKX), 2011, [www.bhs-sonthofen.de](http://www.bhs-sonthofen.de)
- [28] **ELBA Presse-Information:** Elba Einwellen-Zwangsmischer. Selbstverdichtender Beton in 45 Sekunden, *BFT*, S. 34, 6, Bauverlag BV, 2002
- [29] **Baumert, C.; Garrecht, H.:** Mischen von Hochleistungsbeton, *Beton- und Stahlbetonbau*, S. 371-378, 105 (6), Ernst & Sohn, 2010

- [30] **Warning GmbH**: Widia-bestückte Mischwerkzeuge. Die Marathonläufer, BFT, S. 53, 1, Bauverlag BV, 2011
- [31] **MAT Handbuch**: MAT Mischanlagentechnik GmbH, Eigenverlag, 2010
- [32] **Jacob, H. J.**: Alles benetzt. Pulvereintrag in Flüssigkeiten, Verfahrenstechnik, S. 22-24, 32 (7/8), Vereinigte Fachverlage, 1998
- [33] **Rößler, Ch.**: Einfluss von Power-Ultraschall auf das Fließ- und Erstarrungsverhalten von Zementleim, Uni Weimar, S. 259-264 / Band 1, 2009
- [34] **Sorge, G.**: Fanzination Ultraschall, B.G. Teubner, 2002, ISBN: 978-3-519-00415-8
- [35] **Kraus, M.**: Einfluss von Leistungs-Ultraschall auf die Fließeingenschaften und frühe Hydratation von Portland-Zementleim, Diplomarbeit, Weimar, 2011
- [36] **Barnes, H. A.; Hutton, J. F.; Walters, K.**: An Introduction to Rheology, Elsevier, 1989, ISBN: 978-0-444-87140-4
- [37] **Blask, O.**: Zur Rheologie von polymermodifizierten Bindemittelleimen und Mörtelsystemen, Dissertation, GH Siegen, 2002
- [38] **Fachseminar Baustoff-Rheologie** : Thermo Scientific, Eigenverlag, 2007
- [39] **Haist, M.**: Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, Dissertation, TH Karlsruhe, 2009
- [40] **DIN 1342 - Viskosität - Teil 1: Rheologische Begriffe**: Deutsches Institut für Normung (DIN), Beuth, 1999
- [41] **Hankansson, U.**: Rheology of Fresh Cement-Based Grouts, Dissertation, The Royal Institute of Technology, Stockholm, 1993
- [42] **Hu, C.; de Larrard, F.**: The rheology of fresh high-performance concrete, Cement and Concrete Research, S. 283-294, 26 (2), Elsevier, 1996
- [43] **Assaad, J.; Khayat, K. H.; Mesbah, H.**: Assessment of thixotropy of flowable and self-consolidating concrete at early age, ACI Materials Journal, S. 34-39, 100 (2), American Concrete Institute, 2004
- [44] **Roussel, N.**: A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications, Cement and Concrete Research, S. 1797-1806, 36 (10), Elsevier, 2006
- [45] **Wallevik, O. H.**: Practical description of the rheology of fresh concrete, Borregaard Symposium on Workability and Workability Retention, S. 20, 1998
- [46] **Billberg, P.**: Form Pressure Generated by Self-Compacting Concrete - Influence of Thixotropy and Structural Behaviour at Rest , Dissertation, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2006
- [47] **Costa, U., Massazza, F.**: Structure and Properties of Cement Suspensions, Proceedings of the 8th International Congress on the Chemistry of Cement, S. 248-259, 1986
- [48] **Banfill, P.F.G.**: The Rheology of fresh cement and concrete - a review, 11 th International Cement Chemistry Congress Durban, 2003
- [49] **Tattersall, G.H.**: The workability of concrete, A viewpoint, Cement and Concrete Association, 1976, ISBN: 978-0-721-01032-8
- [50] **Coussot, P.; Ancey, C.** , EDP Sciences, 1999, ISBN: 978-2-868-83401-0
- [51] **Fernández-Altale, V.; Casanova, L.**: Influence of mixing sequence and superplasticiser dosage on the rheological response of cement pastes at different temperatures , Cement and Concrete Research, S. 1222-1230, 36 (7), Elsevier, 2006
- [52] **Dehn, F.; Orgass, M.**: Einfluss der Mischtechnik bei Hochleistungsbetonen, BFT, S. 22-28, 1, Bauverlag BV, 2006
- [53] **Wallevik, O. H.; Wallevik, J. E.**: Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes, Cement and Concrete Research, S. 1279-1288, 41 (12), Elsevier, 2011
- [54] **Lowke, D.; Pötz, M.; Schießl, P.**: Optimierung des Mischablaufs für selbstverdichtende Betone, beton , S. 614-616, 55 (12), Bau + Technik, 2005
- [55] **Wischers, G.**: Einfluss langen Mischens oder Lagerns auf die Betoneigenschaften, beton, S. 23-30 und 86-90, 13 (1+2), Bau + Technik, 1963
- [56] **Chopin, D.; de Larrard, F.; Cazacliu, B.**: Why do HPC and SCC require a longer mixing time?, Cement and Concrete Research, S. 2237-2243, 34 (12), Elsevier, 2004
- [57] **Vickers, T. M.; Farrington, S. A.; Bury, J. R.; Brower, L. E.**: Influence of dispersant structure and mixing speed on concrete slump retention, Cement and Concrete Research, S. 1882-1890, 35 (10), Elsevier, 2005
- [58] **Riekert, J.**: Einfluss von Fließmitteln auf das Zeta-Potential und die Rheologie von Zementleimen, Uni Weimar (17. Ibausil), 2009
- [59] **Taylor, H. F. W.**: Cement Chemistry, Academic Press Ltd. London, 1990, ISBN: 978-0-126-83900-5

- [60] **Rößler, Ch.:** Hydratation, Fließfähigkeit und Festigkeitsentwicklung von Portlandzement, Dissertation, Uni Weimar, 2006
- [61] **Pourchet, S.; Regnaud, L.; Perez, J. P.; Nonat, A.:** Early C<sub>3</sub>A hydration in the presence of different kinds of calcium sulfate, *Cement and Concrete Research*, S. 989-996, 39 (11), Elsevier, 2009
- [62] **Zingg, Anatol:** Cement-Superplasticizer Interaction: Link between Macroscopic Phenomena and Microstructural Data of the Early Cement Hydratation, Dissertation, ETH Zürich, 2008
- [63] **Plank, J.; Zhimin D.; Keller, H. et al.:** Fundamental mechanisms for polycarboxylate intercalation into C<sub>3</sub>A hydrate phases and the role of sulfate present in cement, *Cement and Concrete Research*, S. 45-57, 40 (1), Elsevier,
- [64] **Hirsch, C.M.:** Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen polymeren Fließmitteln und Zementen bzw. Mineralphasen der frühen Zementhydratation, Dissertation, TU München, 2005
- [65] **Brameshuber, W.:** Selbstverdichtender Beton, VBT Verlag Bau und Technik, 2004, ISBN: 978-3-764-00417-0
- [66] **Glenium ACE 430:** BASF, Produktbeschreibung, 2009
- [67] **Datum Electronics:** Concrete Mixer Torque Application, 2011, [www.datum-electronics.co.uk](http://www.datum-electronics.co.uk)
- [68] **Lorenz Messtechnik:** WHEATSTONEsche Brücke, 2011, [www.lorenz-messtechnik.de](http://www.lorenz-messtechnik.de)
- [69] **Nordenswan, E.; Käppi, A.:** A new online method of measuring the workability of self-compacting concrete, *RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete*, S. 34-39, 2007
- [70] **Couvrot Skako group:** Ermittlung der Viskosität von Beton in einem Mischer, BFT (7), Bauverlag BV, 2007
- [71] **ICAR Rheometer Manual:** Koehler, E., Germann Instruments, Inc., 2007
- [72] **Leppers, H.:** SPS-Programmierung nach IEC 61131-3, Franzis, 2007, ISBN: 978-3-772-35805-0
- [73] **3s Software:** Produktbeschreibung Codesys, 2011, [3s-software.com](http://3s-software.com)
- [74] **Brosch, P.:** Moderne Stromrichterantriebe: Antriebssystem, Leistungselektronik, Maschinen, Mechatronik und Motion Control, Arbeitsweise drehzahlveränderbarer Antriebe mit Stromrichtern und Antriebsvernetzung, Vogel, 2007, ISBN: 978-3-834-33109-0
- [75] **Böhm, W.:** Elektrische Antriebe, Vogel, 2009, ISBN: 978-3-834-33145-8
- [76] **Pahl, M. H.; Wittig, A.:** Mischen, Rühren, Kneten und Dosieren, *Chemie Ingenieur Technik*, S. 1451-1459, 72 (12), Wiley-VCH, 2000
- [77] **Roussel, N.; Stefani, C.; Leroy R.:** From mini-cone test to Abrams cone test: measurement of cement-based materials yield stress using slump tests, *Cement and Concrete Research*, S. 817-822, 35 (5), Elsevier, 2005
- [78] **Nguyen, T.L.H.; Roussel, N.; Coussot, P.:** Correlation between L-box and rheological parameters of a homogeneous yield stress fluid, *Cement and Concrete Research*, S. 1789-1796, 36 (10), Elsevier, 2006
- [79] **BMBF:** ZIM-KOOP Erfolgsbeispiel: Zeitgewinn beim Bauen durch Ultraschall, 2009, [www.zim-bmwi.de/erfolgsbeispiele/zim-koop-foerderbeispiele/zim-koop-017.pdf](http://www.zim-bmwi.de/erfolgsbeispiele/zim-koop-foerderbeispiele/zim-koop-017.pdf)
- [80] **Öztürk, T.:** Ansteifverhalten und Festigkeitsentwicklung von zementgebundenen Baustoffen - Eine zerstörungsfreie Messmethode auf der Basis von Ultraschall und Reife, Dissertation, TU Darmstadt, 2005
- [81] **de Larrard, F.; Sedran, T.:** Une nouvelle approche de la formulation des betons, , S. , , ,
- [82] **Bulsari, A., Nordenswan, E., Kappi. A.:** Nichtlineare Modelle zur Senkung des Zementverbrauchs durch Optimierung der Zuschlagspackungsdichte, *BWI*, S. 34-39, 2, ad-media, 2008
- [83] **Malhotra, V.M.; Mehta, P.K.:** High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete, American Coal Ash Association, 2008, ISBN: 978-0-973-15077-3
- [84] **Lutze, D.; vom Berg, W.:** Handbuch Flugasche in Beton, *Bau + Technik*, 2009, ISBN: 978-3-764-00502-3
- [85] **Locher, F. W.:** Zement, *Bau + Technik*, 2000, ISBN: 978-3-764-00400-2
- [86] **Peciar, M.; Buggisch H.; Renner M.:** Experimental investigation into the influence of particle size distribution upon the local mixing mechanisms in a flow bulk material, *Chemical Engineering and Processing*, S. 39-44, 33 (1), Elsevier, 1994
- [87] **DIN-Fachbericht 143:** DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, 2005
- [88] **Fehling, E.; Schmidt, M.; Stürwald, S.:** Ultra High Performance Concrete (UHPC): Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete Kassel, Germany, Kassel University Press, 2008, ISBN: 978-3-899-58376-2
- [89] **Urban, D.; Mayerl, J.:** Regressionsanalyse: Theorie, Technik und Anwendung, Vs, 2008, ISBN: 978-3-531-15657-6