

# Innovative Mischkonzepte für die praxisgerechte Herstellung von Hochleistungsbetonen mit Standardmischanlagen

Am Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen (WIB) des Instituts für Massivbau an der TU Darmstadt werden anlagen- und prozesstechnische Entwicklungen vorgenommen, um Bestandsmischanlagen so an die Anforderungen der Mischaufgabe anzupassen und zu ergänzen, dass sich selbst die anspruchsvollen Mischungsrezepturen von SVB, HPC und UHPC mit einer nachgerüsteten Standard-Mischanlage zielsicher herstellen lassen. In den nachfolgenden Ausführungen werden die besonderen Anforderungen feinstoffreicher und wasserarmer Mischungs- zusammensetzungen an den Mischprozess erörtert und verschiedene innovative anlagen- und verfahrenstechnische Methoden aufgezeigt, mit denen sich Fein(st)stoffe optimal aufschließen lassen und das gesamte Mischgut bei minimierter Mischdauer vollständig homogenisieren lassen. Hierzu wurde im Forschungslabor der TUD eine Pilotmischanlage mit zwei unterschiedlichen Mischsystemen aufgebaut. So wurde zum einen ein marktgängiges Doppelwellen-Mischsystem und zum anderen ein Konus-Mischsystem beschafft. Zur Realisierung besonders energieintensiver Mischprozesse wurde das Labor mit einem Kolloidal-Mischsystem ergänzt. Alle Geräteeinheiten wurden am WIB mit der neuesten Generation von Frequenzumrichtern und besonders leistungsfähigen Antriebsmotoren ausgestattet, um auch die besonders anspruchsvollen Betone in optimaler Weise herstellen zu können. Die nunmehr im Mischlabor verfügbare Technologie wird genutzt, um die Anforderungen an Mischprozesse eingehend zu analysieren und für die betonspezifischen Problemstellungen geeignete Mischregime auszuarbeiten. Ziel ist es, die im Mischlabor gewonnenen Erkenntnisse auf große Mischanlagen zu übertragen.

■ Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht, Dipl.-Ing. Christian Baumert, TU Darmstadt, Deutschland ■

## Mischwirkung von Betonmischsystemen

Die Prüfung der Mischwirkung von Betonmischern erfolgt mit Verfahren, wie sie in DIN 459-1:1995-11 „Baustoffmaschinen – Mischer für Beton und Mörtel“ und in ISO 18650-2:2006-04 „Bau- und Baustoffmaschinen - Betonmischer - Verfahren zur Prüfung der Mischwirkung“ angeführt werden. So ist nach DIN 459-2 die Gleichmäßigkeit des Betongemisches durch einen Vergleich festgelegter Mischungsbestandteile der Frischbetonproben überprüft. Hierbei werden die Eigenschaften von Referenzmischungen herangezogen. Als Referenzen werden Frischbetonzusammensetzungen betrachtet, deren Merkmale denen von Normalbetonen entsprechen. Werden moderne Hochleistungsbetone nach DIN 459-2 überprüft, weichen deren Mischungs zusammensetzungen und Frischbetoneigenschaften erheblich von denen normaler Betone ab.

Insbesondere bei modernen Betonen, so den selbstverdichtenden Betonen (SVB), den Hochleistungsbetonen (HPC) wie auch den ultrahochfesten Betonen (UHPC) werden im Vergleich zu Normalbetonen fein(st)stoffreichere und wasserärmere Mischungs zusammensetzungen eingesetzt, so dass zu deren Herstellung deutlich höhere Mischenergieeinsätze erforderlich sind. Nach DIN EN 206 wird ein gleichmäßiges

Erscheinungsbild des Frischbetons gefordert. Da SVB, HPC und UHPC hohe Feinstoffgehalte aufweisen und nur geringe Mengen an Anmachwasser in Verbindung mit weiteren hochwirksamen Betonzusatzmitteln dem Mischgut zugegeben werden, werden für einen vollständigen Aufschluss aller Fein(st)stoffe und für deren innige Durchmischung und Homogenisierung wie auch für eine lückenlose Benetzung aller Feststoffoberflächen mit dem Anmachwasser und den flüssigen Zusätzen besonders hohe Anforderungen an den Mischprozess gestellt. Demgegenüber erweisen sich die gröberen Kornfraktionen hinsichtlich des Mischprozesses als eher unkritisch.

Infolge des zur Herstellung von UHPC notwendigerweise hohen Mischenergieeinsatzes setzen die meisten am DFG-Schwerpunktprogramm SPP 1182 „Nachhaltiges Bauen mit ultrahochfestem Beton (UHPC)“ beteiligten Forschungseinrichtungen ein Eirich-Intensivmischsystem ein. Dessen hohe Mischwerkzeuggeschwindigkeiten gewähren einen dispersiven Mischprozess, der eine Homogenisierung der Feinststoffe ebenso erlaubt wie eine Vereinzelnung der feinen Mischungsbestandteile.

Zielsetzung der Forschungsarbeiten am WIB

In aktuellen Forschungsarbeiten des Fachgebiets Werkstoffe im Bauwesen am Institut für Massivbau der TU Darmstadt (WIB) werden anlagen- und prozesstechnische

Entwicklungen vorgenommen, um Bestandsmischanlagen so an die Anforderungen der Mischaufgabe anzupassen und zu ergänzen, dass selbst die anspruchsvollen Mischungsrezepturen von SVB, HPC und UHPC mit einer nachgerüsteten Standard-Mischanlage hergestellt werden können.

Entsprechend wurde das Forschungslabor mit einem Doppelwellen-Mischsystem, einem Konus-Mischsystem und einem Kolloidal-Mischsystem ausgestattet, um eventuelle Unterschiede bei den erforderlichen Mischzeiten zur Herstellung von Hochleistungsbetonen untersuchen zu können. Die Mischgüte von Standard-Mischsystemen wird dabei im Wesentlichen von der Gleichförmigkeit der Ausgangsstoffe bestimmt, die in der Praxis steten Schwankungen unterworfen sind.

Um einen optimalen Aufschluss der Fein(st)stoffe zu erzielen, wurden am WIB umfassende Untersuchungen mit Kolloidal-Mischsystemen vorgenommen, mit denen sehr hohe Motordrehzahlen und Motorleistungen erreicht werden können. Durch die ergänzende Ausstattung einer Standard-Mischanlage mit einem vergleichsweise günstigen Kolloidal-Mischsystem lässt sich ein zweistufiger Mischprozess realisieren. So werden die Mehlkornbestandteile zunächst mit dem Wasser und den hochwirksamen Betonzusatzmitteln aufgeschlossen. Die so entstehende Suspension wird dem Standard-Mischsystem zugeführt und dann mit den noch zuzugebenden



■ Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht, Technische Universität Darmstadt. Studium an der Universität Karlsruhe, Bauingenieurwesen, 1985-1992. Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe, 1992 Promotion, 1992-1998 Oberingenieur in der Abteilung Baustofftechnologie des o.g. Instituts, 1998 Professur für Baustoffe, Bauphysik und Baukonstruktion an der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, seit 2006 Professur für Werkstoffe im Bauwesen an der Technischen Universität Darmstadt am Institut für Massivbau.

garrecht@massivbau.tu-darmstadt.de



■ Dipl.-Ing. Dipl.-Ing (FH) Christian Baumert. Studium an der Fachhochschule Münster, Bauingenieurwesen, 2001-2003. Tätigkeit in der Bauplanung, Studium an der TU Braunschweig, Bauingenieurwesen, seit 2007 wissenschaftlicher Mitarbeiter am WIB mit dem Schwerpunkt Massivbautechnologie.

baumert@massivbau.tu-darmstadt.de

Gesteinskörnungen vermischt. Auf diese Weise lassen sich kurze Mischzeiten mit optimaler Mischgüte sicherstellen.

Zur Ansteuerung der drei am WIB eingesetzten Mischsysteme werden modernste Frequenzrichter eingesetzt, die in Verbindung mit einer rechnergestützten Erfassung und Bewertung der Motordaten einen optimalen Mischbetrieb erlauben.

### Anforderungen an Mischsysteme zur Herstellung von Hochleistungsbetonen

Unter Hochleistungsbetonen werden heute Betone verstanden, die unterschiedlichste Merkmale von außergewöhnlicher Leistungsfähigkeit aufweisen. Während selbstverdichtende Betone auf ihre besonderen Fließeigenschaften hin entwickelt werden, zeichnen sich hochfeste Mischungen vorrangig durch im Vergleich zu Normalbetonen deutlich gesteigerte Druckfestigkeiten aus. Steht eine hohe Dauerhaftigkeit im Vordergrund, bieten puzzolanreiche Betone, wie HVFA-Betone (High-Volume Fly-Ash Concrete) interessante betontechnologische Alternativen.

Grundsätzlich unterscheiden sich die Zusammensetzungen der Hochleistungsbetone abhängig der ihnen zugedachten Leistungsmerkmale deutlich von denen der Normalbetone. So sind die Rezepturen der Hochleistungsbetone durch (deutlich) erhöhte Anteile an Fein(st)stoffen, durch einen gegenüber Normalbetonen zumeist reduzierten Wassergehalt und durch die Zugabe erhöhter Mengen an Fließmittel gekennzeichnet. Neben dem vollständigen Aufschluss und der Vereinzelung der Fein(st)stoffe kommt dabei auch der gleichmäßigen Verteilung der flüssigen Komponenten, dem Anmachwasser und den hochwirksamen bauchemischen Zusätzen eine große Bedeutung zu, da diese beim Mischen allen Oberflächen der zugegebenen Feststoffteilchen zugeführt werden müssen.

### Mischtechnik

Die Prüfung der Mischwirkung eines Betonmischers ist nach DIN 459-2 anhand dreier Prüfbetone vorzunehmen. Diesen drei Mischungen wird eine festgelegte Anzahl an Proben entnommen, an denen neben dem Wassergehalt und der Konsistenz auch die Feststoffanteile mittels Siebanalyse zu bestimmen sind. Die Beurteilung der mit einem Mischsystem erzielten Mischgüte erfolgt anhand von Variationskoeffizienten, die für jede Komponente der Mischungszusammensetzung zu bestimmen sind. Grundsätzlich unterscheiden sich die Zusammensetzungen der Prüfbetone, die nach DIN 459-2 als 3-Stoff-Systeme zu formulieren sind, infolge ihrer geringen Feinstoffgehalte, ihrer hohen w/z-Werte und des Verzichts auf den Einsatz von Fließmitteln wesentlich von den Mischungszusammensetzungen heutiger Hochleistungsbetone.

Lassen sich die Feststoffe der feinstoffärmeren Normalbetone ohne größeren Aufwand durchmischen und homogenisieren, so sind beim Mischen von Hochleistungsbetonen Besonderheiten hinsichtlich der Mischgutbewegung zu beachten. Nach [1] stellen sich zwei unterschiedliche Mischgutbewegungen beim Mischen von feinstoffreichen Zusammensetzungen ein. Während sich die groben Bestandteile leicht durch konvektive Mischgutbewegungen durchmischen lassen, kommt bei feinstoffreicher Mischgutzusammensetzung den dispersiven Anteilen des Mischprozesses eine große Bedeutung zu. Dieser ist gekennzeichnet durch ein zufälliges Zusammentreffen der feinen Partikel (Feinvermischung), das ein Auflösen von Agglomeraten und damit die Vereinzelung feinsten Partikel ermöglicht. Somit lassen sich nicht nur die groben Bestandteile, sondern auch die Fein(st)stoffe im Mischgut gleichmäßig verteilen.

Ein Vergleich der Frischbetone nach DIN 459-2 erlaubt lediglich Aussagen zur Gleichmäßigkeit der Kornverteilung. Inwieweit mit dem Mischsystem eine Durchmischung, Homogenisierung und Vereinzelung der in der Mischung enthaltenen Fein(st)stoffe sichergestellt werden kann, lässt sich nach DIN 459-2 nicht beurteilen. Entsprechend ist das für Normalbetone bewährte Prüfverfahren zur Mischwirkung von Mischsystemen nicht auf Hochleistungsbetone, bei denen es sich i.d.R. um 5- oder 6-Stoff-Systeme handelt, übertragbar.

Die bei Hochleistungsbetonen fein(st)stoffreicheren und wasserärmeren Mischungen benötigen für das nach DIN EN 206 geforderte gleichmäßige Erscheinungsbild einen gesteigerten dispersiven Transportanteil beim Mischen. Die Grobverteilung verliert im Gegenzug an Bedeutung. In den meisten Mischern übernehmen die Mischwerkzeuge sowohl den Transport des Mischgutes (Grobverteilung) als auch den eigentlichen Mischvorgang (Feinverteilung). Nach [2] und [3] wird beim Trog- und Tellermischer zur Erzielung einer gleichmäßigen hohen Mischgüte eine langsame Wasserzugabe, eine auf die Mischsystemgröße abgestimmte Werkzeuggeschwindigkeit und Mischdauer, ein optimaler Abstand zwischen Mischwerkzeug und Mischerwandung und eine optimale Breite der Mischwerkzeuge gefordert.

Insbesondere die Herstellung von UHPC erfordert ein hochwertiges Mischsystem, dessen Mischwerkzeuge hinsichtlich Form und Anordnung wie auch Betrieb auf die



Abb. 1: Mischanlage am Institut für Massivbau, TU Darmstadt

Mischanforderungen des Mischguts angepasst sind. Im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP 1182 (UHPC), gefördert durch die DFG, hat sich die Mehrzahl der beteiligten Forschungseinrichtungen für den Einsatz des Intensivmischsystems vom Typ Eirich entschieden. Hier wird das Mischgut durch einen schräg stehenden, drehbaren Mischbehälter durch Wandreibung nach oben transportiert und fällt auf Grund der Schwerkraft und angeordneter Abstreifer wieder nach unten. Das so in den inneren Bereich des Mischgefäßes geführte Mischgut wird dann dem eigentlichen Mischvorgang zugeführt, der von einem schnell drehenden, exzentrisch angebrachten Wirbler übernommen wird.

Alternativ zum Einsatz dieses spezifischen Intensivmischsystems werden am Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen des Instituts für Massivbau der TU Darmstadt technologische Entwicklungen vorgenommen, um auch mit marktgängigen Standard-Mischsystemen anspruchsvolle Hochleistungsbetone herstellen zu können. Hierzu bedarf es verschiedenster anlagentechnischer Anpassungen und Ergänzungen, um auch die im Vergleich zu Normalbetonen feinstoffreichere und wasserärmere Zusammensetzung der Hochleistungsbetone zielsicher herstellen zu können. Maßgaben sind hierbei neben der Erreichung einer optimalen Mischgüte auch die Einhaltung möglichst kurzer Mischzeiten, um den Energieverbrauch zu minimieren.

Anlagenspezifisch liegt der Schwerpunkt der Forschungen und Entwicklungen im Einsatz modernster Mess- und Regelsysteme, um die rheologischen Eigenschaften des von der Zugabe der Einzelkomponenten

abhängigen Mischguts kontinuierlich über den gesamten Verlauf des Mischprozesses hinweg erfassen und bewerten zu können. Die stete zugabespezifische Anpassung des Einsatzes der im Mischsystem verfügbaren Mischwerkzeuge (Auswahl, Drehrichtung, Drehgeschwindigkeit) führt zu einer mit Blick auf Homogenisierung und Mischdauer optimalen Durchmischung des Mischguts. Mit Standard-Mischsystemen lassen sich über die Standard-Mischwerkzeuge aber nur begrenzte Mengen an Mischenergien zuführen. Entsprechend werden in den laufenden Untersuchungen anlagentechnische Erweiterungen eingesetzt, mit denen sich die feinstoffreichen Mischgutanteile mit den flüssig zuzugebenden Komponenten optimal durchmischen und aufschließen lassen. Mit einer zweistufigen Verfahrensweise der Frischbetonherstellung können zunächst die dispersiven Mischvorgänge auf kostengünstige und energieeffiziente Weise realisiert werden, indem die Fein(st)stoffe mit dem Anmachwasser und den hochwirksamen Betonzusatzmitteln in optimaler Weise aufgeschlossen und homogenisiert werden können. Die so vorbereitete Suspension kann dann der Standard-Mischanlage zugeführt werden, in der die größeren Fraktionen des Gesteinskorns mittels konvektiver Mischgutbewegung vollständig mit der vorbereiteten Feinstoffsuspension bei üblicher Mischdauer von Normalbetonen durchmischt werden können.

Abb. 1 zeigt die am Institut für Massivbau verfügbaren Mischtechnologien. So sind in der rechten Bildhälfte ein Doppelwellen-Mischsystem und ein Kolloidal-Mischsystem dargestellt. Das Doppelwellen-Mischsystem steht stellvertretend für die breite Palette an

Mischsystemen, wie sie in Standard-Mischanlagen zu finden sind. Mit dem Kolloidal-Mischer lässt sich ein optimaler Aufschluss der Fein(st)stoffe und der flüssigen Komponenten erzielen. Die Ansteuerung der beiden Mischsysteme erfolgt über die jüngste Generation von Frequenzumrichtern, die eine stete Auslesung der Leistungsdaten und Drehzahlen der fremdbelüfteten Antriebsmotoren erlauben. In der linken Bildhälfte ist ein Konus-Mischer (Fa. Kniele) dargestellt. Dieser kann anhand seines spezifischen Aufbaus und seiner beiden unabhängig voneinander nutzbaren Mischwerkzeuge hohe Energien in das Mischgut einbringen. Auch mit dem Konus-Mischer vom Typ Kniele können daher Hochleistungsbetone hergestellt werden, ohne ein Vormischen der Fein(st)stoffe mit den flüssigen Komponenten vornehmen zu müssen.

Bevor die zweistufige Herstellung von Hochleistungsbetonen mit dem Kolloidal-Mischsystem und dem Doppelwellen-Mischsystem eingehend erörtert werden soll, wird nachfolgend zunächst das Konus-Mischsystem vom Typ Kniele erläutert. Gemäß Abb. 2 befindet sich in Behältermitte eine vertikal angebrachte Mischwelle. An der Behälterwandung sind äußere Abstreifer angeordnet, die in gleiche oder gegenläufige Drehrichtung der inneren Mischwelle betrieben werden können. Die innere Mischwelle kann durch die Anzahl, die Größe, den Abstand und Neigung der Mischwerkzeuge an die spezifischen Anforderungen des Mischguts angepasst werden. Die innere Mischwelle und der äußere Abstreifer sind in der am WIB realisierten Ausführung in ihrer Drehzahl über Frequenzumrichter beliebig regelbar und ermöglichen so den für Hochleistungsbetone erforderlichen hohen dispersiven Anteil der

Mischgutführung. Mit einer auf die Anforderungen des herzustellenden Hochleistungsbetons stetig anpassbaren Leistung und Drehzahl der beiden Motoren für die innere Mischwelle und den äußeren Abstreifer lassen sich deutlich verkürzte Mischzeiten bei gleichzeitig deutlich höheren Ausbreit- bzw. Setzfließmaßen erreichen.

Eine weitere Optimierung des Mischprozess wird mit einer gestuften Zugabe der einzelnen Mischgutkomponenten erreicht. Werden in einem ersten Schritt die Mehlkornbestandteile (ggf. auch die Sandfraktion) mit dem Anmachwasser und Fließmitteln zugegeben und mit Werkzeuggeschwindigkeiten von 6-8 m/s durchmischt, kommt es zu einem optimalen Aufschluss der Suspension. In einem zweiten Schritt erfolgt dann die Zugabe der groben Gesteinskornfraktionen, die mit deutlich geringerer Drehzahl der inneren Mischwelle untergemischt werden. Für die zweistufige Vorgehensweise ist eine geringere Motorleistung erforderlich, als wenn der Mischprozess derart erfolgt, dass alle Feststoffanteile zunächst trocken homogenisiert und anschließend mit den flüssigen Komponenten durchmischt werden müssen.

Als weitere interessante Anwendung des Konus-Mischsystems vom Typ Kniele hat sich die schonende Einarbeitung von leichtem Gesteinskorn in die vorgemischten Mehlkornbestandteile und Anmachwasser/Betonzusatzmittel erwiesen, da das innere Mischwerkzeug durch den großen Abstand zur Behälterwandung die Gesteinskörnung nicht zerstören kann. Untersuchungen von Thienel [4] zeigten, dass in Standard-Mischsystemen bis zu 10 % der leichten Gesteinskörnung während des Mischvorgangs zerstört werden können.

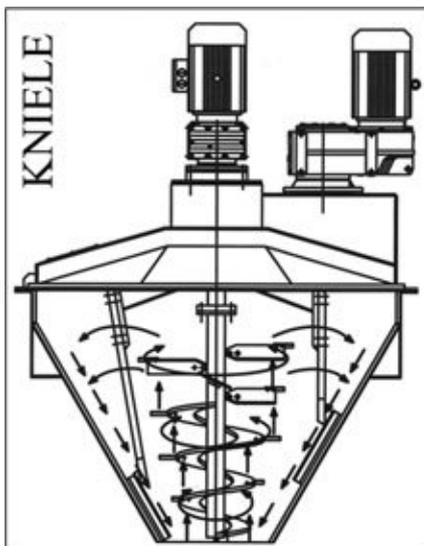


Abb. 2: Mischprinzip Konusmischer Typ Kniele

Um die Möglichkeiten der Herstellung von Hochleistungsbetonen mit Standard-Mischsystemen aufzeigen zu können, wurde ein Doppelwellen-Mischsystem Typ BHS beschafft. Doppelwellen-Mischsysteme verfügen über zwei axiale Mischwellen, die mit einem Marktanteil von über 50 % als Standard bei der Transportbetonherstellung angesehen werden können. Auch wenn sich die übrigen Mischsysteme, wie sie in der Betonherstellung zum Einsatz kommen, z.B. Planeten-Mischsysteme, in ihrer Mischgutführung vom Doppelwellen-Mischsystem unterscheiden, sollten alle nachfolgend aufgezeigten Untersuchungsergebnisse auf alle Standard-Mischsysteme übertragbar sein. Zur Herstellung von Hochleistungsbetonen wird dabei grundsätzlich ein zweistufiger Mischprozess vorgeschlagen, bei dem die erste Mischstufe



Abb. 3: Hohe Werkzeug-Geschwindigkeit, Doppelwellen-Mischer

die dispersive Aufschließung der feinkörnigen und flüssigen Bestandteile umfasst. In der zweiten Mischstufe erfolgt lediglich noch der konvektive Mischprozess, bei dem die bereits optimal aufgeschlossene und homogenisierte Suspension mit den größeren Gesteinskorn-Fractionen durchmischt wird.

Soll ein Doppelwellen-Mischsystem zur Herstellung eines Hochleistungsbetons eingesetzt werden, muss die für das Herstellen von Normalbetonen übliche Mischzeit von 30 Sekunden deutlich verlängert werden.

Wird die Werkzeuggeschwindigkeit zu sehr erhöht, führt dies im Allgemeinen zu einer deutlich schlechteren Mischgüte, da das Mischgut durch die schnellere Drehbewegung der Mischwerkzeuge lediglich hochgeworfen wird (Abb. 3). Ein kontrollierter Umlauf des Mischguts durch den Mischer kann auf diese Weise nicht mehr stattfinden.

Wird der bereits angeführte zweistufige Mischprozess gewählt, bei dem die Fein(st)-stoffe in optimaler Weise in den flüssigen Bestandteilen von Anmachwasser und Fließmittel mittels eines Kolloidal-Mischsystems aufgeschlossen und die entstehende Suspension dann im Standard-Mischer den groben Gesteinskornfraktionen untergemischt werden, lassen sich Hochleistungsbetone auch problemlos mit anlagentechnisch nachgerüsteten und erweiterten Standard-Mischanlagen herstellen. Dabei ermöglichen die moderaten Investitionskosten für ein auf die Größe der Standard-Mischanlage angepasstes Kolloidal-Mischsystem eine wirtschaftliche Modernisierung von Standard-Mischanlagen, die es den Betreibern anschließend erlaubt, alle Betone auf dem Markt anbieten zu können. Neben einer hohen Mischgüte und Gleichförmigkeit der Frischbetone lassen

sich dabei selbst anspruchsvolle Hochleistungsbetone in großen Mengen bei vergleichsweise kurzen Mischzeiten zielsicher herstellen.

Wesentliche Elemente der vom WIB gewählten zweistufigen Betonherstellung sind:

- 1) Herstellung der die Fein(st)stoffe enthaltenden Suspension im Kolloidal-Mischsystem
- 2) Zuführung der Suspension in die Standard-Mischanlage
- 3) kurzzeitiges konvektives Vermischen von Suspension und Gesteinskörnung in der Standard-Mischanlage

Somit können Hochleistungsbetone ohne eine Reduzierung der von Normalbetonen bekannten Produktionsmengen in gleichen Taktzeiten der Mischerbeschickung herge-

stellt werden. Dieses Vorgehen folgt einer konsequenten Trennung von dispersiven und konvektiven Mischgutbewegungen, wie sie für die zielsichere Herstellung von Hochleistungsbetonen mit hoher Mischgüte unabdingbar sind. Durch die Trennung der konvektiven und der dispersiven Transportvorgänge lassen sich zudem erhebliche Einsparungen hinsichtlich der für den gesamten Mischprozess erforderlichen elektrischen Energie erzielen. So wird bei alleinigem Betrieb eines Standard-Mischsystems eine große Energiemenge lediglich für den viel zu hohen Anteil der konvektiven Mischgutbewegung eingebracht, ohne dass ein optimaler Aufschluss der feinen Bestandteile und eine gleichmäßige Verteilung der flüssigen Komponenten auf der Partikeloberfläche sichergestellt werden kann.

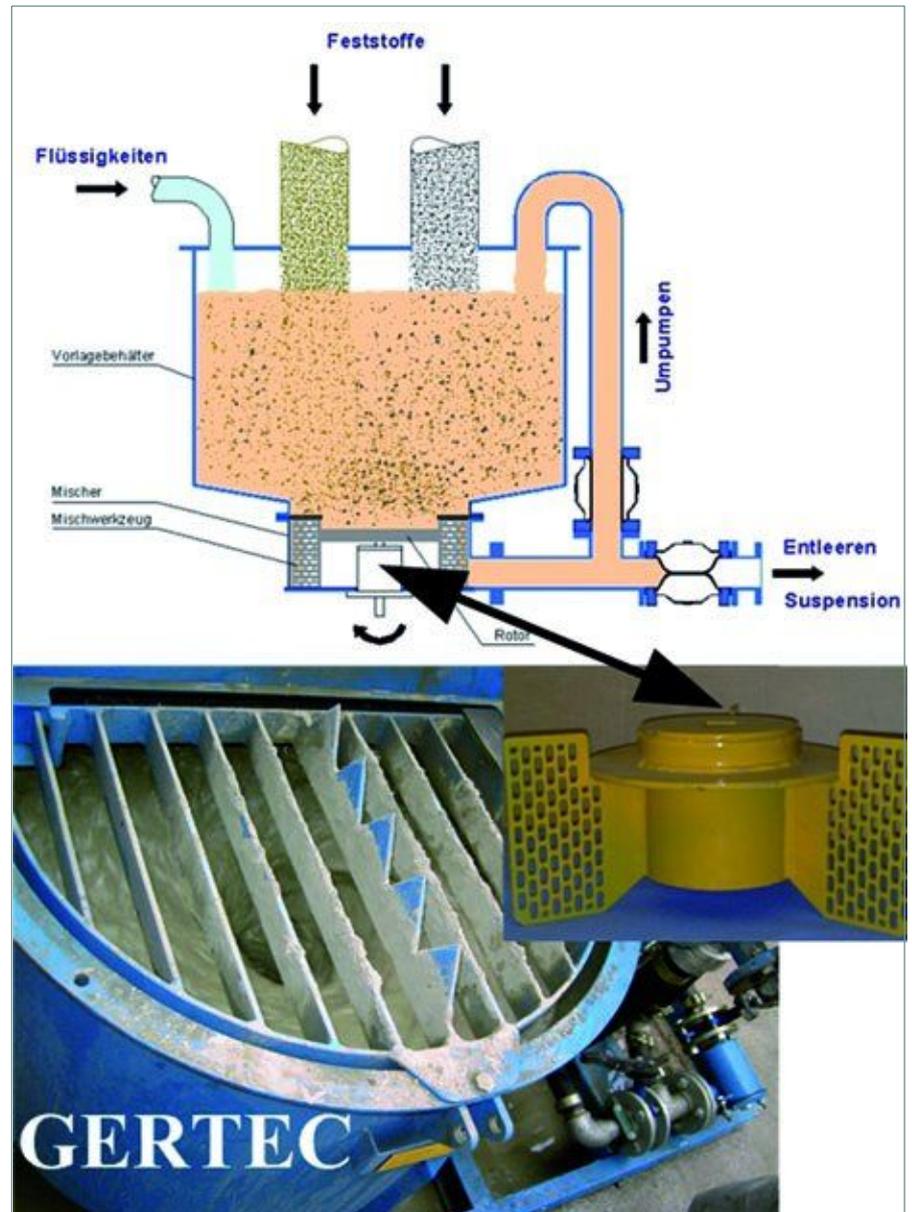


Abb. 4: Kolloidal-Mischer

Während in Standard-Mischanlagen mit Werkzeuggeschwindigkeiten von ca. 1,5 m/s gearbeitet wird, werden in Intensiv-Mischsystemen phasenweise Werkzeuggeschwindigkeiten von ca. 6-8 m/s als optimal angesehen [5] und [6].

Bei Kolloidal-Mischsystemen (Abb. 4) werden demgegenüber die direkt auf der Motorwelle befindlichen Mischwerkzeuge mit Werkzeuggeschwindigkeiten zwischen 15 m/s und 25 m/s betrieben. Eine Benetzung der feinen Feststoffpartikel mit Wasser und den zugegebenen Betonzusatzmitteln wie auch die mechanische Zerteilung von Agglomeraten ist bei diesem dispersiven Mischprozess sichergestellt und führt so zu sedimentationsstabilen kolloidal-dispersen Gemischen, die für den Fall der Herstellung von Hochleistungsbetonen als stabile Suspensionen direkt dem Standard-Mischsystem zugeführt werden können. Sind größere Betonmengen zu produzieren, können die mit dem Kolloidal-Mischsystem hergestellten Suspensionen auch in größeren Gefäßen zwischengelagert werden, um ggf. eine gleichförmige Produktionsleistung der Standard-Mischanlage bei hoher Taktrate sicherzustellen.

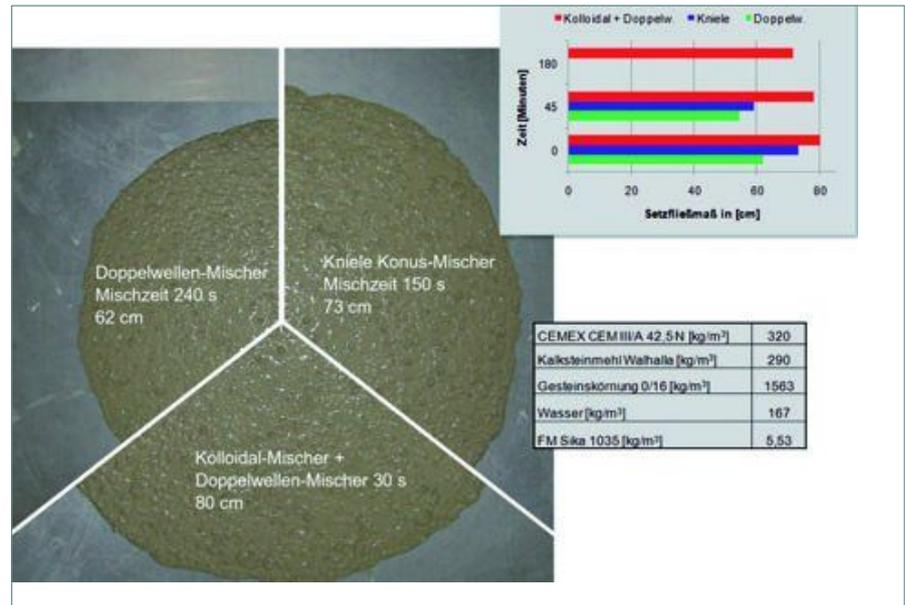


Abb. 5: SVB mit verschiedenen Mischtechniken

- Um die Folgen der zweistufigen Mischtechnologie auf die Frischbetoneigenschaften aufzuzeigen, wurde ein SVB vom Mehlskorntyp nach Okamura mit nachfolgenden Mischprozessen hergestellt:
- 1) alleinige Verwendung des Doppelwellen-Mischsystems
  - 2) alleinige Verwendung des Konus-Mischsystems Typ Kniele
  - 3) zweistufige Herstellung als Kombination aus Kolloidal-Mischsystem und Doppelwellen-Mischsystem

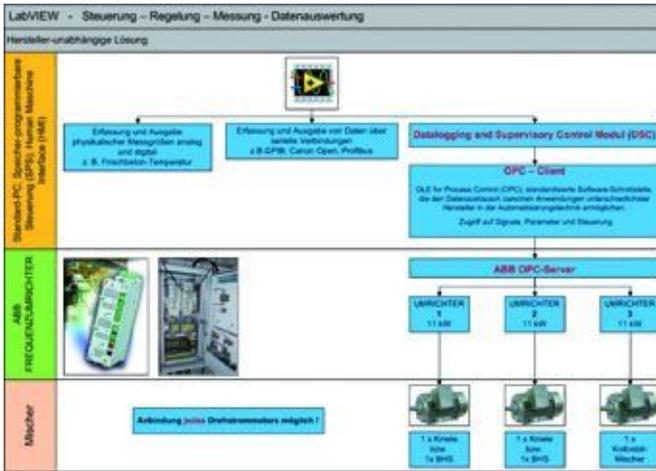


Abb. 6: Anlagensteuerung

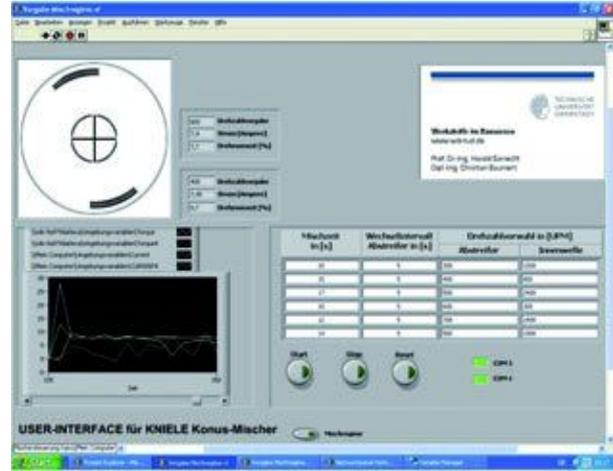


Abb. 7: Mischregime Konus-Mischer

Die in Abb. 5 aufgezeigten Ergebnisse belegen, dass mit zunehmendem dispersivem Anteil der Mischgutbewegung das Setzfließmaß des SVB deutlich ansteigt. Zudem kann mit dem kolloidalen Aufschluss der Mehlkornbestandteile mittels Kolloidal-Mischsystem die Verarbeitbarkeit des SVB am Längsten aufrecht erhalten werden.

Mischregime

Bei der anlagentechnischen Auslegung der in Abb. 1 dargestellten Labormischsysteme wurde darauf geachtet, dass sich möglichst alle in der Praxis und in Aufgaben aus Forschung & Entwicklung aufkommende Fragestellungen weitestgehend ohne Einschränkungen untersuchen lassen. Um beispielsweise den Transport von Beton in Mischfahrzeugen simulieren zu können, ist es zwingend erforderlich, die Mischsysteme bei sehr niedrigen Werkzeuggeschwindigkeiten zu betreiben. Hier reicht aber die Eigenkühlung der Drehstrommotoren nicht aus, die unterhalb von 20 Hz im Dauerbetrieb unweigerlich zu Motorschäden führt. Entsprechend wurden die leistungssteigerten Motoren fremdbelüftet und können mit Frequenzumrichtern der neuesten Generation über einen erweiterten Drehzahlbereich betrieben werden.

Über eine am WIB realisierte Schnittstelle konnten die Frequenzumrichter der Antriebsmotoren aller drei im Forschungslabor zum Einsatz kommenden Mischsysteme an einen Rechner angekoppelt werden, so dass zwischenzeitlich Softwarelösungen herausgearbeitet werden konnten, mit denen sich über nutzerfreundliche Bedienoberflächen die Mischprozesse von Normal- und Hochleistungsbetonen nicht nur optimal erfassen, sondern auch in geeigneter Weise steuern lassen. So lassen sich die Mischregime der verschiedensten Betone in einer Weise optimieren, in denen die für die

Bewältigung der Mischaufgabe erforderliche Motorenleistung und -drehzahl an die Art und Dosiergeschwindigkeit der jeweils zuzugebenden Bestandteile der Betonzusammensetzung angepasst wird. Eine derartige Vorgehensweise erlaubt nicht nur die Erzielung optimaler Mischgütern, sondern auch eine kürzest mögliche Mischdauer.

Zur softwaregestützten Überwachung und Steuerung der Mischprozesse wird die Software LabVIEW eingesetzt, die über die Software-Schnittstelle OPC (OLE for Process Control) die direkte Einbindung der Frequenzumrichter ohne zusätzliche Hardware ermöglicht. Im Ergebnis können durch dieses offene System herstellernunabhängig alle Drehstrommotoren betrieben und deren Motordaten ausgelesen werden (Abb. 6).

Nach [7] lässt sich der eigentliche Mischvorgang in mehrere Phasen unterteilen. Bei sehr feinstoffreichen Mischungen wird allgemein mit einer Trockenmischphase begonnen und in kurzer Zeit mit geringstem Energieaufwand ein Hauptanteil der Mischarbeit realisiert. Mit der nachfolgenden Wasserzugabe bilden sich zwischen den Partikeln Flüssigkeitsbrücken aus, die wie Haftkräfte wirken. Diese Haftkräfte müssen von den Mischwerkzeugen überwunden werden, um eine gleichförmige Homogenisierung erzielen zu können. Hierzu müssen die Motoren im Vergleich zur Trockenmischphase mit einem höheren Drehmoment betrieben werden. Mit der Zugabe der Fließmittel fällt mit der einsetzenden Wirkung des Fließmittels der Leistungsbedarf der Antriebsmotoren im weiteren Verlauf des Mischprozesses ab. Erreicht das Drehmoment der Motoren sein Minimum, ist die Mischung – abhängig von der jeweils zum Einsatz gekommenen Mischtechnik – optimal aufgeschlossen. Mit einer Verlängerung der Mischzeit wird

keine weitere Verbesserung der Frischbetoneigenschaften erzielt. Im Gegenteil, durch den sich bei weiterem Mischbetrieb einstellenden Partikel-Abrieb kommt es zu einer Vergrößerung der Partikeloberfläche und durch weitere Reibung der Partikel untereinander stellen sich höhere Mischguttemperaturen ein, die schlechtere Frischbetoneigenschaften zur Folge haben.

Für die einzelnen Mischphasen lassen sich über die mit LabVIEW erstellte Bedienoberflächen die Dauer der einzelnen Mischphasen und die hierbei vorzusehenden Werkzeuggeschwindigkeit frei festlegen. Alle aus Sicht des Nutzers relevanten Motordaten können hierbei erfasst werden, und sie lassen sich direkt auswerten und visualisieren. Zudem können alle Daten archiviert werden. In laufenden Forschungsarbeiten werden am WIB Softwareentwicklungen vorgenommen, mit denen die Anpassung der Leistung und Drehzahl der Antriebsmotoren der zum Einsatz kommenden Mischwerkzeuge über eine Bewertung des Mischprozessverlaufs vom Leitrechner eigenständig ermittelt werden. Zudem wird die Dauer der einzelnen Mischphasen individuell an den Verlauf des Mischvorgangs angepasst.

Entsprechend lassen sich die Mischabläufe bei der Herstellung selbst schwierigster Rezepturen optimieren. Wird die Suspension des zuvor aufgezeigten SVB im Kolloidal-Mischsystem bei konstanter Werkzeuggeschwindigkeit (Abb. 8) von 15 m/s hergestellt, fallen erhebliche Unterschiede hinsichtlich des Leistungsbedarfs der Antriebsmotoren zwischen der manuellen Zugabe von Zement und von Kalksteinmehl auf, obgleich diese ähnliche Blaine-Werte aufwiesen. So lag das Motordrehmoment bei der Zementzugabe immer unter 100 %. Bei Zugabe von Kalksteinmehl kommt es sofort zu einer deutlichen Überlastung des Antriebs.

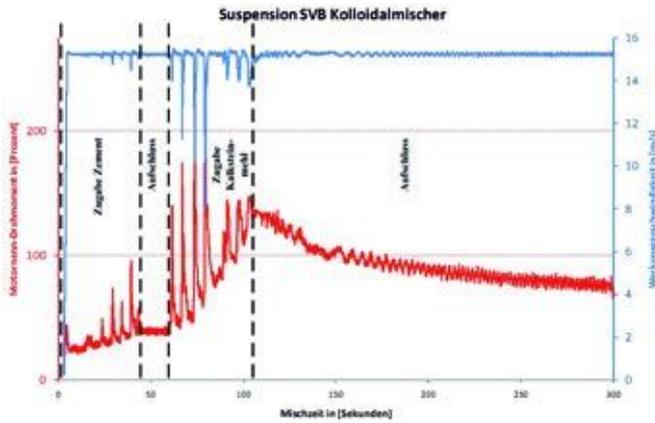


Abb. 8: Kolloidal-Mischer konstante Drehzahl

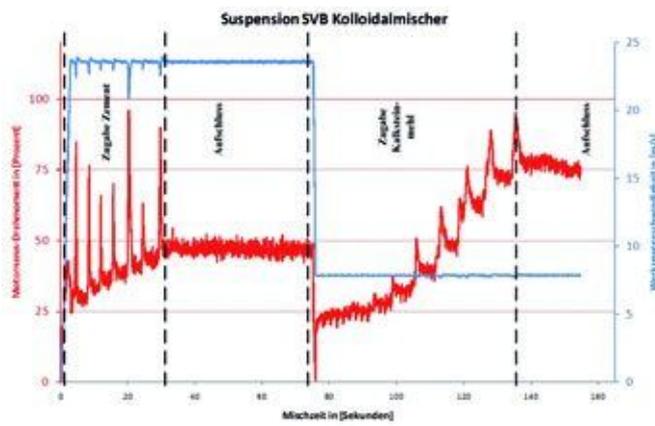


Abb. 9: Kolloidal-Mischer 2 Geschwindigkeiten

Entsprechend dieser Beobachtungen wurde in einer ersten Phase eine gesteigerte Werkzeuggeschwindigkeit (25 m/s) gewählt, in der die Zementzugabe erfolgte (Abb. 9). Entsprechend der höheren Werkzeuggeschwindigkeit konnte die Motorauslastung bei der Zementzugabe deutlich gesteigert werden, um eine möglichst hohe Effizienz der ersten Mischphase sicherzustellen. In der zweiten Mischphase, in der das Kalksteinmehl der Zementsuspension zugegeben wird, erfolgt zunächst eine deutliche Rücknahme der Werkzeuggeschwindigkeit (8 m/s). Hierdurch konnte die Kalksteinmehlzugabe ohne Überlastung des Antriebs in optimierter Weise realisiert werden. Die reduzierte Werkzeuggeschwindigkeit führt darüber hinaus auch zu einer um 2 Kelvin geringeren Erwärmung der Suspension, so dass sich auch ein höheres Setzfließmaß erzielen lässt.

Um die Dauer des Mischvorgangs zu verkürzen, um den Mischenergiebedarf zu minimieren und um die Eigenschaften der Suspension zu optimieren, wird gegenwärtig an einer automatisierten Zuführung der Ausgangsstoffe gearbeitet. Ein effektiver Mischprozess wird dann erreicht, wenn das Motordrehmoment möglichst fortlaufend auf nahezu 100 % des Motorenndrehmoments gehalten werden kann. Dazu werden die Geschwindigkeit des kontinuierlichen Mehlkorneintrages in das Mischgefäß wie auch die von der Art des Mehlkorns abhängige Drehzahl des Motors geregelt.

#### Rheologische Parameter

Die Erfassung der Motorleistung während des Mischvorganges ermöglicht nach [5], [6] und [7], das optimale Mischende zu erken-

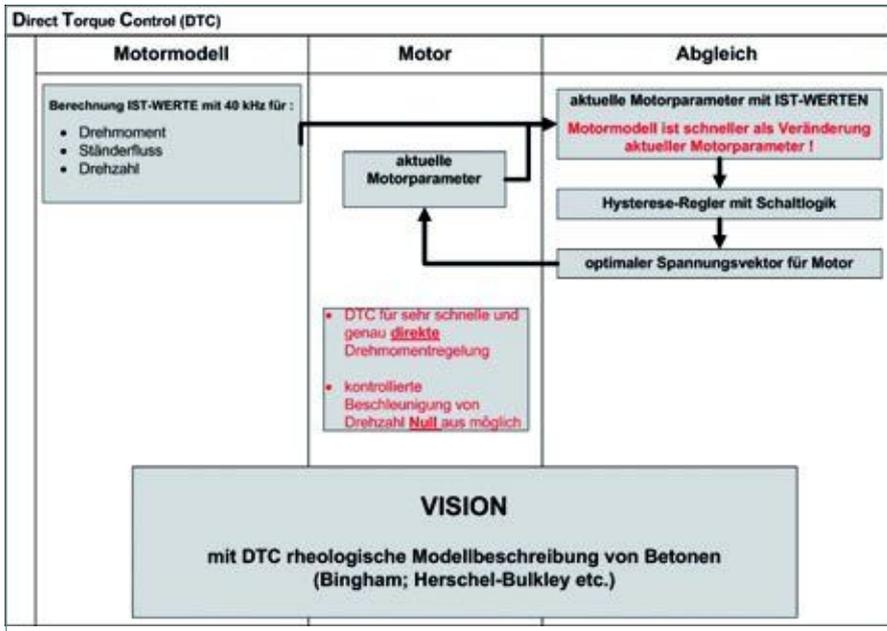


Abb. 10: Direct Torque Control Regelung Frequenzumrichter

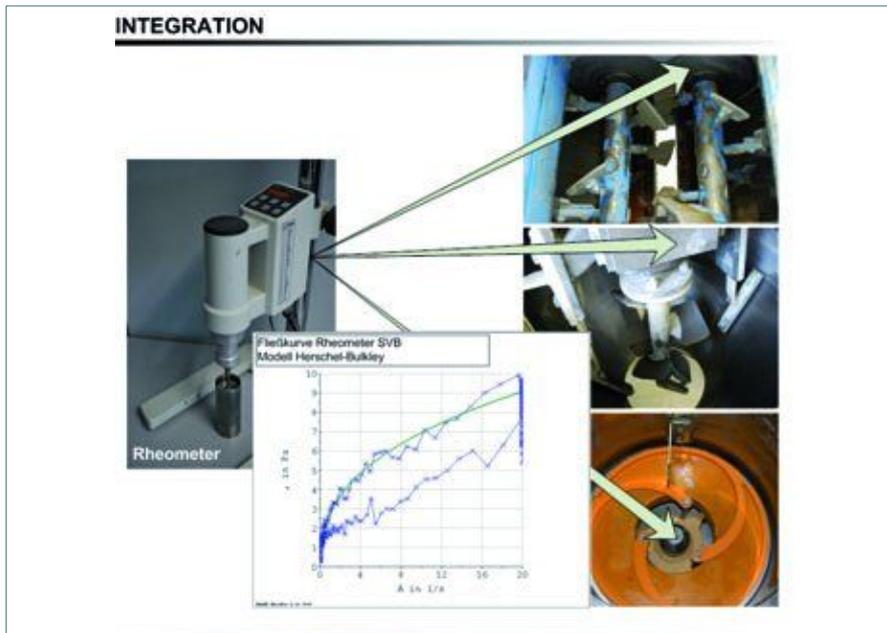


Abb. 11: Integration Rheometer in den Mischer

nen. Die Motorleistung sinkt während des Mischvorgangs asymptotisch und zeigt die mit der eingesetzten Mischtechnik erreichbare maximale Homogenisierung der Ausgangsstoffe und gleichmäßige Verteilung von Wasser und Fließmittel auf.

Mit den am WIB verfügbaren Mischtechnologien können mit der Bewertung der im Mischverlauf anfallenden Motordaten zu Leistungsaufnahme und Drehzahl die Entwicklung von Mischprozesssteuerungen vorangetrieben werden, mit denen aktiv und selbstregelnd die Werkzeugeschwindigkeiten der einzelnen Mischphasen, die optimale Dosierung der zuzugebenden

Stoffe in flüssiger und fester Form wie auch die frühestmögliche Beendigung der Mischphase festgestellt und kontrolliert werden können.

Nicht zuletzt könnte auf diese Weise den zahlreichen Schwankungen in der Zusammensetzung und Granulometrie der Ausgangsstoffe entgegengewirkt werden. Mit der äußerst sensiblen Erfassung, Bewertung und Anpassung des Motormoments und der Motordrehzahl kann demgegenüber sehr sensibel auf derartige Veränderungen reagiert werden. Gleiches gilt auch für die Problematik der Berücksichtigung der Feuchte im Gesteinskorn, die gerade

bei der Herstellung von Hochleistungsbetonen einen großen Einfluss auf die Frischbetoneigenschaften ausübt.

Die vielfältigen bekannten Unwägbarkeiten bei der kontinuierlichen Erfassung der Materialfeuchte, die Einflüsse auf den Mischprozess und die Mischgüte infolge von Schwankungen der Zusammensetzung und Granulometrie von Zement und sonstigen Fein(st)stoffen, die wechselnde Oberflächenbeschaffenheit und Granulometrie von Sanden sind, wie vielfach in der Literatur z.B. in [8] beschrieben, nur schwer erfassbar und lassen sich somit bei der Festlegung der Mischungszusammensetzung kaum berücksichtigen. Mit dem zunehmenden Einsatz von Zementaustauschstoffen wie auch der Verwendung neuer hochwirksamer Betonzusatzmittel wird die Sicherstellung einer gleichförmigen Mischgüte der Hochleistungsbetone weiter erschwert.

Folglich lassen sich die Mischgüte und die Frischbetoneigenschaften von Hochleistungsbetonen bislang nur nach Mischende durch klassische Frischbetonprüfungen beurteilen. Alternativ könnten während des Mischprozesses rheologische Eigenschaften der Betonmischung analysiert und bewertet werden. Üblicherweise wird das rheologische Verhalten eines Gemischs mit einem Rheometer charakterisiert. Hierzu wird ein Messwerkzeug in einer Betonprobe vom Stand aus auf eine vorgegebene Drehzahl beschleunigt und dabei das Drehmoment erfasst. Hierfür werden eine sehr präzise Drehzahlregelung und eine sehr zuverlässige und hinreichend genaue Erfassung des Drehmoments benötigt.

Will man das Mischsystem selbst als Rheometer nutzen, erlauben die üblichen Frequenzumrichter mit Vektorregelung, die den gegenwärtig Stand der Technik bei der stufenlosen Drehzahlregelung von Drehstrommotoren darstellen, nur mit Einschränkungen einen entsprechenden Einsatz. Hier erweist sich von Nachteil, dass während des Betriebs Mindestgeschwindigkeit von ca. 2-3 Hz gefordert werden, um die geforderte hohe Genauigkeit von Drehgebern in den Drehstrommotoren zu gewährleisten.

Am WIB wurden daher beim Aufbau der Labormischsysteme die neueste Generation von Frequenzumrichtern der Fa. ABB eingesetzt, die mit Direct Torque Control (DTC) arbeiten und bereits ohne Drehgeber die Genauigkeit von vektorgeregelten Systemen erreichen, welche hierzu zusätzliche Hardware erfordern. Neben der direkten Ansteuerung des Drehmoments kann mit

der neuesten ABB Frequenzumrichter-Technologie zudem ein kontrolliertes Anfahren der Antriebsmotoren aus dem Stand (0 Hz) realisiert werden. Hierbei arbeitet das DTC-Verfahren (Abb. 10) mit einem berechneten Motormodell, das die wichtigen Parameter wie Drehzahl, Drehmoment und Ständerfluss alle 0,025 ms berechnet und mit den aktuell gemessenen Motordaten vergleicht. Da das Motormodell die zu erwartenden Werte schneller berechnen kann als sich die aktuellen Motordaten ändern, wird eine außergewöhnliche Regelgenauigkeit erzielt.

Werden die Mischwerkzeuge des Mischers aus dem Stand heraus beschleunigt, und die hochgenauen Motordaten erfasst, lassen sich mit softwaretechnischen Lösungen mittels LabVIEW nicht nur die Messwerte erfassen, sondern auch Bewertungen rheologischer Modelle nach Bingham, Herschel-Bulkley etc. vornehmen (Abb. 11). Entsprechen die Frischbetoneigenschaften den Anforderungen, kann dieses rheologische Modell als Referenz dienen.

Jede Charge kann dann, ohne die Produktionsabläufe zu stören, auf ihre rheologischen Kenngrößen hin überprüft werden. Liegt die Fließgrenze eines SVB dann gegenüber der Referenz zu hoch, kann mit einer entsprechenden Menge FM korrigiert werden. Ist hingegen die Viskosität zu gering, ermöglichen Viskositätsmodifizierer einen gezielten Eingriff.

Im Ergebnis können mit den aufgezeigten Aufrüstungen und Ergänzungen von Mischsystemen selbst schwierig zu handelnde Hochleistungsbetone zielsicher in großtechnischer Weise hergestellt werden. Hierbei gilt es nicht nur die Mischgüte zielsicherer als mit den bekannten Mischsystemen zu erreichen, sondern diese muss auch in kürzerer Zeit und in besserer Qualität realisiert werden können. Zudem reagieren die anlagentechnisch auferüsteten Mischsysteme wesentlich unempfindlicher auf die herstellungsbedingten Veränderungen der Ausgangsstoffe.

### ■ Literatur

- [1] Stieß, M.: Mechanische Verfahrenstechnik 1, Zweite Auflage. Berlin : Springer Verlag, 1995.
- [2] Beitzel, H.: Einfluss der Mischdauer auf die Betonmischgüte. BMT, Heft 2, s.1., Bd. 27, 1980, Seite 77-83.
- [3] Beitzel, H.: Gesetzmäßigkeiten zur Optimierung von Betonmischern; Teil 1 und Teil 2. Heft 11 und Heft 12, s.I. : BMT, 1981, Bde. 28; Seiten 586-602 und Seite 641-647.
- [4] Thienel, K. Chr. Werkstoffe des Bauwesens Leichtbeton. s.I. : Universität der Bundeswehr, 2006.
- [5] Orgass, M.; Dehn, F.: Einfluss der Mischtechnologie bei Hochleistungsbetonen. BFT, 1/2006, s.I., 2006.
- [6] Schießl, P.; Lowke, D.; Pötz, M.: Optimierung des Mischablaufs für selbstverdichtende Betone. Beton, 12/2005, s.I., 2005.
- [7] Schmandra, A.: Mischen von Sonderbetonen. BFT, 12/2005, s.I., 2005.
- [8] Kirpach, C.; Waldmann, D.; Greger, M.: Untersuchung des Einflusses von Sanden auf den Wasser- und Fließmittelanspruch von selbstverdichtenden Mörteln. Beton, 6/2008, s.I., 2008.