



**Antrag im Rahmen des zentralen Innovationsprogramms
Für den Mittelstand – „ZIM“**

Anlagen 2 und 4

**„Entwicklung eines neuartigen Suspensionsmischverfahrens und
eines innovativen Schräglagenmischers zur Herstellung von
Hochleistungsbetonen“**



Inhaltsverzeichnis

4. Erläuterung der technischen und technologischen Zielsetzung des Projekts.....	1
4.1 Beschreibung des Projekts	1
4.1.1 Ausgangssituation und Marktbedarf.....	1
4.1.2 Beabsichtigte technologische Entwicklung	4
4.1.3. Angestrebte technische Funktionalitäten und relevante Parameter mit zugehörigem Lösungsweg	7
4.1.4 Technische Risiken des FuE - Projekts entlang des Lösungswegs	29
4.1.6 Aktuelle Konkurrenzprodukte/-verfahren zum internationaler Stand der Technik im Vergleich mit den geplanten Entwicklungszielen.....	32
4.1.7 Anteil des Antragsstellers am gesamten Vorhaben, Charakterisierung des innovativen Kerns des Teilprojektes und Abgrenzung zu den anderen Teilprojekten	37
4.2.5 Definition von Meilensteinen zur Erreichung der Zielkriterien.....	39

4. Erläuterung der technischen und technologischen Zielsetzung des Projekts

4.1 Beschreibung des Projekts

4.1.1 Ausgangssituation und Marktbedarf

Die Zeiten, als Beton noch ein einfaches 3-Stoff-Gemisch aus Zement, Wasser und Zuschlag war, sind vorbei. High-Tech-Beton besteht heute aus einem komplexen System zahlreicher Einzelkomponenten wie Zement, Gesteinskörnung aus Sand oder Kies (Zuschlag), Wasser, Zusatzstoffen wie Fließmittel oder Farbstoffen und Luft. Durch intelligentes Variieren und Modifizieren dieser Bestandteile kann Beton neue Verarbeitungs- und Nutzungseigenschaften gewinnen, beispielsweise als Beton, der nicht mehr durch Rütteln verdichtet werden muss (selbstverdichtender Beton, SVB), als hochfester oder ultrahochfester Beton (UHFB), als säureresistentes Baumaterial, als Faserbeton mit Zusatz von Stahl- oder Glasfasern, als Leichtbeton oder selbstreinigender Beton. Im Folgenden werden die einzelnen Bestandteile näher dargestellt und die Komplexität der Betonherstellung verdeutlicht.



Abbildung 4.1: Ausbringung von Frischbeton. Quelle: www.immoexperten.de

Zement ist in der Betonherstellung ein unverzichtbarer Bestandteil. Es werden fünf Hauptarten von Zement unterschieden:

- CEM I: Portlandzement - Hauptbestandteil des Portlandzements ist feingemahlener Portlandzementklinker
- CEM II: Portlandkompositzement - Zusammensetzung aus verschiedenen Hauptbestandteilen, die jeweils durch Angaben der Kennbuchstaben in der Zementbezeichnung zu erkennen sind. Je nach Zugabemenge der Hauptbestandteile werden einige Portlandkompositzemente in die Gruppen A und B eingeteilt
- CEM III: Hochofenzement - Hauptbestandteile sind Portlandzementklinker und Hüttensand
- CEM IV: Puzzolanzement
- CEM V: Kompositzement

Gesteinskörnungen (Zuschlag) für Normal- und Schwebeton sind ein Gemenge oder Haufwerk von ungebrochenen oder gebrochenen Körnern, aus natürlichen oder künstlichen mineralischen Stoffen, die durch das Bindemittel Zement zu Beton verkittet werden. Ihre Qualität hat großen Einfluss auf den Beton. Sie nehmen im Mittel etwa 70% des Betonvolumens ein und bilden somit mengenmäßig den Hauptbestandteil des Betons. Gesteinskörnungen können von Natur aus bereits in einer für die Betonherstellung geeigneten Form vorliegen. Falls erforderlich wird er durch mechanische Prozesse, wie Zerkleinern, Sieben, Waschen, aufbereitet. Verschiedentlich wird er auch aus natürlich vorkommenden Stoffen oder aus Neben- bzw. Abfallprodukten bestimmter industrieller Prozesse künstlich hergestellt. Für Gesteinskörnungen ist ein Größtkorn von 16 mm oder 32 mm üblich.

Gerade für moderne Sichtbetone und anspruchsvolle Betonwaren hat die Wahl der Gesteinskörnung eine ganz besondere Bedeutung. Der Trend geht zu immer feinkörnigeren Betonen. Geeignet sind alle Stoffe, die eine für den jeweiligen Verwendungszweck des Betons ausreichende Kornfestigkeit aufweisen, die Erhärtung des Zementes nicht stören, einen ausreichenden Haftverbund mit dem Zementstein ergeben und die Beständigkeit des Betons nicht beeinträchtigen.

Bindemittel sind im plastischen Zustand verarbeitbare anorganische oder organische Substanzen, die im Laufe einer bestimmten Zeit erhärten und dabei andere Stoffe fest miteinander verbinden. Die Bindemittel sind mineralischen Ursprungs und werden, mit einigen Ausnahmen, aus bestimmten Gesteinen durch Brennen gewonnen und mehlfein gemahlen. Mit Wasser angemacht entsteht zuerst der Bindemittelleim. Durch chemische Umsetzungen, teilweise auch durch physikalische Oberflächenkräfte, verfestigt sich der Bindemittelleim in einen steinartigen Zustand, wobei Füllstoffe miteinander verkittet werden können.

Betonzusatzmittel sind Stoffe, die dem Beton in feinverteilter Form (flüssig, pulverförmig, in bestimmten Fällen auch als Granulat oder als Paste) in geringen Mengen zugesetzt werden, um durch chemische oder physikalische Wirkung bestimmte Eigenschaften des Frischbetons oder des erhärteten Betons zu beeinflussen. Bei einer höchstzulässigen Zugabemenge von 50 g bzw. 50 ml je kg Zement für Beton und Stahlbeton bzw. 20 g bzw. 20 ml je kg Zement für Spannbeton spielen sie stoffraummäßig keine Rolle, sehr wohl jedoch für die Qualität des Produktes. Betonzusatzmittel müssen betonverträglich sein und dürfen den Korrosionsschutz der Bewehrung nicht beeinträchtigen. Aus diesem Grunde dürfen bestimmte chemische Verbindungen als Wirkstoffe (z.B. Halogene, Nitrite, Nitrate) nicht zugesetzt werden. Wirkungsgruppen von Betonzusatzmitteln:

- Betonverflüssiger (BV)
- Fließmittel (FM)
- Luftporenbildner (LP)
- Dichtungsmittel (DM)
- Verzögerer (VZ)
- Beschleuniger (BE)
- Einpresshilfen (EH)
- Stabilisierer (ST)

Betonzusatzstoffe sind fein verteilte Stoffe, die im Beton verwendet werden, um bestimmte Eigenschaften zu verbessern oder zu erreichen. Betonzusatzstoffe (auch Füller genannt) sind als Volumenbestandteile zu berücksichtigen, da diese dem Beton in deutlich größerer Menge zugegeben werden als die Betonzusatzmittel. Es werden zwei Arten von anorganischen Zusatzstoffen unterschieden:

- Typ I: nahezu inaktive Zusatzstoffe wie Gesteinsmehle nach DIN EN 12620, Gesteinskörnungen für Beton oder Pigmente nach DIN EN 12878
- Typ II: puzzolanische oder latentlydraulische Zusatzstoffe wie Trass nach DIN 51043; Flugasche nach DIN EN 450 oder Silicastaub

Die komplexe stoffliche Zusammensetzung von Hochleistungsbetonen, insbesondere durch die neuesten Entwicklungen in den vergangenen Jahren, bedingt jedoch auch höhere Anforderungen an

die Mischtechnik und Mischverfahren. Bisher werden beim Anmischen des Betons zuerst die trockenen Bestandteile wie Zement oder Zuschlag in den Mischer gegeben und die flüssigen Komponenten wie Wasser oder Fließmittel erst danach eingerührt. Diese führt jedoch aufgrund des großen Anfangswiderstandes zu einem hohen benötigten Energieeintrag, langen Mischzeiten, inhomogener Durchmischung, ungewollter Partikelagglomeration bzw. Verklumpung und Funktionsverlust reaktiver Stoffe. Dies wirkt sich zudem negativ auf die Betonqualität nach der Aushärtung aus. Die bestehende Problematik zeigt sich beispielsweise deutlich bei der Herstellung von farbigen Mischungen für Betonpflaster. Während des Mischprozesses kommt es zur Agglomeration von Farbpartikeln und deren Sedimentation. Infolge dessen entsteht ein ungewollter Farbgradient im Endprodukt, der vom Kunden nicht gewünscht wird. Dies tritt auch in Zusammenhang mit weiteren kleinen Partikeln wie Zement und Zusatzmittel auf. Um dies auszugleichen, müssen die entsprechenden Komponenten stark überdosiert zugegeben werden. Dies erhöht jedoch den Materialeinsatz, die Mischdauer und die daraus resultierenden Kosten.

Darüber hinaus sind bestehende Mischeranlagen mit hohem apparativem Aufwand verbunden und deren Ausstattung wie Mischwerkzeuge oder Abstreifer sind nicht umfassend auf die rheologischen Eigenschaften der verschiedenen Betonmischungen ausgelegt. Dies führt dazu, dass konventionelle Mischertypen die angestrebten Frischbetoneigenschaften entweder nicht oder nur nach sehr langer Mischzeit erreichen können. Da der Energieeintrag aktuell nicht zielgerichtet und kaum auf das jeweilige Mischverfahren und die Betonrezeptur angepasst ist, entsteht ein hoher Energieaufwand und Partikelagglomerate können dennoch nicht vollständig gelöst werden.

Daher ist die Entwicklung eines neuartigen Mixers, welcher die schnelle, energiesparende und homogene Durchmischung sämtlicher Komponenten ermöglicht, unbedingt notwendig. Ebenso wird die Entwicklung eines innovativen Suspensionsmischverfahrens benötigt, um die Agglomeration von kleinen Partikeln zu verhindern, Überdosierungen zu vermeiden, Material einzusparen und letztendlich Kosten zu reduzieren sowie die Betonqualität zu erhöhen.

Suspensionsmischverfahren

Es existieren bereits Ansätze für die Herstellung von Beton im Suspensionsmischverfahren. Das Vorgehen hierbei besteht in der verfahrenstechnischen Trennung der Herstellung von Leim bzw. Mörtel in einem Suspensions-Mischer und der 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 erlangen¹. Da die größte Körnung der Feststoffe einer Zement-Suspension Einfluss auf die Eindringtiefe der Suspension bei einer Injektion hat, ist ein kolloidaler Aufschluss, d. h. die größtmögliche Verteilung der Partikel mit einem Durchmesser von ca. 0,1-0,001 mm in der Flüssigkeit, relevant. Partikel mit Durchmessern unter 30 µm 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

¹ **MAT Handbuch:** MAT Mischanlagentechnik GmbH, Eigenverlag, 2010

sonit selbst eine Dispersion von Feststoffen in Luft dar². Nach Auflösung der Partikel-Zusammenschlüsse müssen die einzelnen Partikel mit Wasser- und Fließmittelmolekülen benetzt werden, um eine erneute Agglomeration zu verhindern. In aktuellen Suspensions-Mischern 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 s⁻¹ und einer Maschinen-Froude-Zahl von über 200 [-]. 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 Implosionen außerhalb der hochturbulenten Zonen wirkt als „Druckbenetzung“.

Ein Nachteil des existierenden Suspensionsmischverfahrens besteht darin, dass Zuschlag und Leim bzw. Mörtel getrennt angerührt werden müssen und deshalb ein zweiter Mischer notwendig ist. Die effektive Mischdauer ist abhängig vom Mischvolumen entsprechend hoch. Das zu entwickelnde Suspensionsmischverfahren soll jedoch erstmals die Mischung von Leim und Zuschlag in einem einzigen Mischer ermöglichen und damit den apparativen Aufwand praktisch halbieren.

4.1.2 Beabsichtigte technologische Entwicklung

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines innovativen Suspensionsmischverfahrens für die Herstellung verschiedener Betonarten, um die Agglomeration von Partikeln zu verhindern sowie eine schnellere und homogenere Durchmischung zu erreichen. Dabei sollen, anders als bisher üblich, die flüssigen bzw. feinkörnigen Komponenten des Betons wie Wasser bzw. Zement zuerst vermengt werden und der grobkörnige Zuschlag erst danach eingearbeitet werden. Das Verfahren wird dabei voraussichtlich in 4 Stufen unterteilt:

1. Phase: Zugabe der flüssigen und feinkörnigen Komponenten wie Wasser und Zement
2. Phase: Einbringung der grobkörnigen Komponenten (Zuschlag)
3. Phase: Zugabe weiterer reaktiver Komponenten wie z.B. Fließmittel zur Erreichung einer längeren Aktivitätsphase in der fertigen Betonmischung
4. Phase: Exakte Einstellung des angestrebten Feuchtigkeitsgehalts (WZ-Wert)

Das Suspensionsmischverfahren soll dabei anhand von 5 Referenzrezepturen, welche die gesamte Bandbreite verschiedener Betonarten abdecken, zunächst im Labormischer entwickelt werden. Dabei werden die Betonmischungen zudem rheologisch charakterisiert und entsprechende Grenzwerte für die Prozessführung ermittelt. Anschließend können die Ergebnisse im Zuge eines Scale Ups auf den neuartigen Mischer übertragen werden. Durch einen gezielten Energieeintrag in den jeweiligen Mischphasen soll zudem Energie eingespart und die Partikelagglomeration verhindert werden. Die

² Baumert, C.; Garrecht, H.: Mischen von Hochleistungsbeton, Beton- und Stahlbetonbau, S. 371-378, 105 (6), Ernst & Sohn, 2010

Entwicklung des innovativen Suspensionsmischverfahrens wird vom IWB der Universität Stuttgart übernommen.

Die Erarbeitung des Suspensionsmischverfahrens soll durch mit Hilfe von CFD-Simulationsmodellen, welche die Strömungsdynamik und Partikelagglomeration im Mischer abbilden können, unterstützt werden. Dabei sollen voraussichtlich drei verschiedene Modelle mit unterschiedlicher Genauigkeit und Berechnungsaufwand entwickelt werden, sodass der gesamte Suspensionsmischvorgang in den einzelnen Phasen hinsichtlich Turbulenzen, Durchmischung, Dissipation, dynamischer Viskosität, interpartikulärer Wechselwirkungen und der daraus folgenden Partikelagglomeration zuverlässig und mit jeweils vertretbarem Aufwand abgebildet werden kann.

- Modell 1: Rheologisches 1-Phasen-Modell für eine erste, grobe Charakterisierung des Suspensionsmischvorgangs und Optimierung der Mischerwerkzeuge
- Modell 2: Multiphase particle-in-cell Ansatz (MPPIC) unter Berücksichtigung der Partikel als zweite, reaktive Phase zur Untersuchung der interpartikulären Interaktionen
- Modell 3: Kombiniertes CFD-DEM-Modell zur Verifizierung bzw. Kalibrierung der anderen Modelle und Abbildung der vollen mechanischen Abbildung der Partikel sowie Kopplung zum Fluid

Dazu werden die Modelle jeweils mit einem (Des-)Agglomerationsmodell erweitert, für die Maße, Geometrien und Ausrichtung des zu entwickelnden Mixers angepasst und eine Aufwandsreduzierung zur Verringerung der benötigten Rechendauer und –leistung durchgeführt. Außerdem sollen auf Basis der CFD-Simulationen Mischerwerkzeuge für die spezifischen Rezepturen hinsichtlich Energieeintrag und Scherrate optimiert werden. Die Entwicklung der CFD-Simulationsmodelle übernimmt die Novicos GmbH.

Gleichzeitig soll ein neuartiger Schräglagenmischer entwickelt werden, der im Vergleich zu bisherigen Anlagen eine schnellere und homogenere Durchmischung der Betonkomponenten ermöglicht. Die Entwicklung beinhaltet einen Mischbehälter, der gegenüber der Horizontalen geneigt ist (Abbildung 4.3). Der Mischbehälter wird dabei voraussichtlich zylindrisch gestaltet sein, kann alternativ jedoch auch konus- oder kegelstumpfförmige Formen aufweisen. Der Neigungswinkel soll idealerweise 30 ° bis 60° betragen. Ferner soll der Antrieb des Mischwerkzeugs in zwei entgegengesetzte Richtungen betreibbar sein, sodass zwischen zwei Drehrichtungen umgeschaltet werden kann. Der Mischer wird als Einwellenmischer ausgeführt. Gegenüber Zweiwellenmischern kann somit auf einen Antrieb verzichtet und der apparative Aufwand deutlich reduziert werden. Die beschriebene Gestaltung des Mixers ermöglicht im Vergleich zum Stand der Technik kürzere Mischzeiten für sämtliche Betonarten, gleichzeitig aber das Erreichen von homogenen Mischungen. Dies wird insbesondere dadurch erreicht, dass während des Mischvorgangs das gesamte Mischgut in Bewegung ist, da dieses durch Gravitationskräfte an den untersten Punkt des Mischbehälters gedrückt wird, wo es durch ein Mischwerkzeug periodisch wiederkehrend bewegt wird. Durch den Wechsel der Drehrichtung wird das gesamte Material noch umfassender bewegt und der Mischeffekt dadurch verstärkt, dass das Material in einer Drehrichtung an die untere Wandung gedrückt wird, in der anderen Drehrichtung aber unter anderem durch Abstreifer zurück in Richtung der eigentlichen Mischvorrichtung gefördert wird. Somit erfolgt der Quertransport des Mischgutes aufgrund der Schrägstellung des Mischbehälters sowie des gegenläufigen Betriebs des Mischwerkzeugs. Dies lässt aufgrund der verbesserten Aufschließung die Einsparung von Zement zu. In der Herstellung von Fertigteilen, bei der beispielsweise Farbe zu Zement hinzugegeben wird, kann die Farbe somit deutlich besser verteilt werden. Zudem ist bei Medien mit starkem Dichteunterschied (z.B. Styroporkugeln in Beton) eine signifikant schnellere und bessere

Durchmischung möglich. Außerdem ist die Integration einer Lanze geplant, welche durch eine Öffnung in das Innere des Mischbehälters einfahrbar ist. Diese ist mit einem Ende mit einem Vibrationsmotor verbunden und kann mit dem anderen Ende mit dem Mischwerkzeug in Kontakt stehen, um die Vibrationen auf diesen zu übertragen. Insbesondere bei Mischwerkzeugen mit großer Oberfläche, was in diesem Projekt voraussichtlich der Fall sein wird, stellt dies einen Vorteil bei der Reinigung dar. Die Entwicklung des neuartigen Schräglagenmischers auf Basis einer Patentanmeldung wird von der Kniele GmbH durchgeführt.

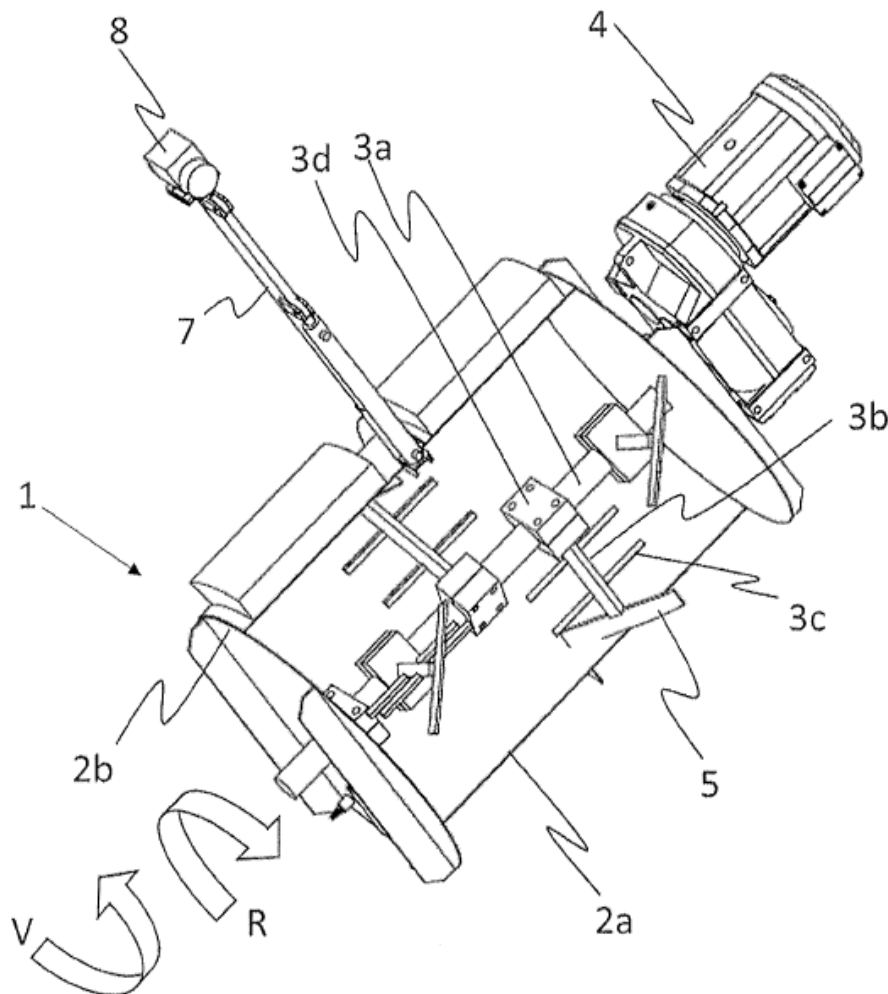


Abbildung 4.3: Skizze des angestrebten Schräglagenmischers der Kniele GmbH. (1) Mischapparat (2a) zylinderförmige Mischbehälter (2b) Bodenplatte (3a) mittlere Welle (3b) Mischvorrichtung (3c) Verzweigungen (3d) Verbindungseinrichtungen (4) Antrieb (5) Abstreifer (7) Lanze (8) Vibrationsmotor

Um den Zustand der Betonmischung während des Prozesses zu überwachen und die rheologischen Eigenschaften in Echtzeit charakterisieren zu können, soll ein Condition Monitoring System sowie eine spezielle Regelung für das Suspensionsmischverfahren entwickelt werden. Dazu werden Temperatursensoren sowie Feuchtigkeits- bzw. Mikrowellensonden mit einer Konsistenzmessung durch Erfassung der benötigten Motorleistung kombiniert. Die innovative Herausforderung besteht vor allem in der Auslegung des Condition Monitoring Systems auf die spezifischen Anforderungen des Suspensionsmischverfahrens hinsichtlich eines Platzierungskonzeptes für die Sensoren und der

komplexen Referenzierung der gemessenen Daten. Über die Erfassung signifikanter Veränderungen der Messwerte, sollen zudem Informationen über den Verschleiß des Mischers und einzelner Anlagenkomponenten wie z.B. die Mischwerkzeuge generiert werden können. In Verbindung mit den Erkenntnissen zum rheologischen Verhalten der Betonmischungen, soll ein Steuerungs- bzw. Regelungssystem inklusive Soft- und Hardware entwickelt werden, welches sämtliche Parameter überwachen, den spezifischen Mischprozess verschiedener Rezepturen sowie die Dosierung einzelner Komponenten automatisch steuern und dadurch eine konstant hohe Qualität des Produktes ermöglichen kann. Die Entwicklung des Condition Monitoring Systems und der zugehörigen Regelungstechnik wird von der Bikotronic GmbH übernommen.

Die zu entwickelnden Innovationen bieten gegenüber dem Stand der Technik folgende Vorteile:

- Um bis zu 15 % schnellere Durchmischung sämtlicher Beton-Komponenten
- Homogener Durchmischung und Lösung von Zement und Feinpartikeln. Dadurch kann die ungewollte Partikelagglomeration um bis zu 80 % reduziert werden.
- Es wird kein zweiter Mischer benötigt
- Einsparung von Zement um bis zu 15 %, dadurch
- Einsparung von Zusatzmitteln um bis zu 10 %
- Reduzierung des indirekten CO₂ Ausstoßes bei der Zementherstellung
- Reduzierter Energiebedarf um bis zu 10 %
- Reduzierung des apparativen Aufwandes des neuartigen Mischers, da u. a. nur ein Antrieb notwendig ist
- Spezifische Mischwerkzeuge für optimalen Energieeintrag und Durchmischung
- Zustandsüberwachung des Betons während des Mischprozesses in Echt-Zeit
- Automatische und rezeptspezifische Regelung des Suspensionsmischprozesses und der Dosierung einzelner Komponenten

Eine erwartete Entwicklung für die Zukunft ist der Einsatz von zementlosem Beton. Da hierbei auf die Produktion von Zement, die für 5 -6 % der weltweiten CO₂-Produktion verantwortlich ist, verzichtet werden kann, stellt dies eine umweltfreundliche Alternative für die Bauindustrie der Zukunft dar. Das geplante Suspensionsmischverfahren sowie der neuartige Schräglagenmischer sollen schon jetzt den Zementeinsatz drastisch reduzieren und sind im Gegensatz zu aktuellen Systemen und Verfahren auch für die Herstellung von zementlosem Beton einsetzbar. Die geplante Entwicklung wird somit auch den Durchbruch des umweltfreundlichen Betons beschleunigen.

4.1.3. Angestrebte technische Funktionalitäten und relevante Parameter mit zugehörigem Lösungsweg

Der Lösungsweg und die ausführliche Beschreibung der technischen Funktionalitäten erfolgt in den folgenden Arbeitspaketen. Der geplante zeitliche Verlauf der jeweiligen Arbeitspakete zur Erreichung der notwendigen Meilensteine ist Anlage 5 zu entnehmen. Dort sind auch die Aufschlüsselung der eingeplanten Personen-Monate sowie die jeweiligen Verantwortlichkeiten der Projektpartner wiedergegeben. Die Kooperationspartner werden während der Durchführung Ihrer jeweiligen Arbeitspakete eng zusammenarbeiten, sodass die einzelnen Teilergebnisse von allen Partnern genutzt und darauf aufgebaut werden kann.

Im Folgenden sind die angestrebten technischen Parameter dargestellt. Da die konkreten Werte stark von dem Mischvolumen und der Betonrezeptur abhängig sind, beziehen sich die Angaben jeweils auf eine herkömmliche Mischanlage bzw. etablierte Mischverfahren.

Parameter	Zielwert
Reduzierung der Mischdauer (abh. von Rezeptur)	Ca. 15 - 20 %
Reduzierung von Partikelagglomeration	Mind. 80 %
Zement einsparung (abh. von Rezeptur)	Ca. 10 – 15%
Einsparung von Zusatzmitteln (abh. von Rezeptur)	Ca. 5- 10 %
Reduzierung des indirekten CO ₂ Ausstoßes	Ca. 10 %
Energieeinsparung durch gezielten Energieeintrag	Ca. 10 %
Voraussichtliches Volumen des Mischers	Ca. 500 - 1000 Liter
Voraussichtliche Motorleistung	20 - 30 kW
Genauigkeit des Condition Monitoring Systems	Mind. 98%
Genauigkeit des Regelungssystems	Ca. 98%
Abbildungsgenauigkeit der CFD-Simulationsmodelle	Ca. 95%

AP 1: Festlegung der technischen Rahmenbedingungen und Anforderungen an das Projekt (IWB, Kniele GmbH, Novicos GmbH, Bikotronic GmbH)

Das Arbeitspaket 1 wird von allen Projektpartnern in enger Kooperation durchgeführt.

AP 1.1: Die erste Phase des Projekts besteht aus der Definition der relevanten Anforderungen und Rahmenbedingungen für die Entwicklung der geplanten Innovation. Während der Konzeption kommt es zur Formulierung der wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Vorteile des geplanten Projekts und Dokumentation der gesetzlichen Normen sowie sonstiger Regularien, die in den Rahmen des Projekts fallen.

AP 1.2: Des Weiteren wird die Planung und Umsetzung der Aufgabenverteilung sowie die Konkretisierung relevanter Parameter unter den Projektteilnehmern vorgenommen. Den Startpunkt des Projekts bildet die Detaillierung des Gesamtkonzepts im Rahmen eines Pflichtenheftes, welches projektbegleitend als Dokumentations- und Kontrollmaßnahme dient, sowie die Abhaltung eines Kick-Off-Meetings.

AP 2: Entwicklung eines mehrstufigen Suspensionsmischverfahrens und Beton-Referenzrezepturen sowie rheologische Charakterisierung

AP 2.1 (IWB): Zunächst wird das IWB ca. 5 Referenzrezepturen für verschiedene Betone entwickeln, anhand derer das Suspensionsmischverfahren erarbeitet werden soll und die das gesamte Spektrum verschiedener Betonarten abdecken. So wird ein flexibler und umfassender Einsatzbereich des neuartigen Verfahrens ermöglicht. Das IWB wird in diesem Arbeitsschritt für jede Rezeptur die benötigten Mengenverhältnisse der jeweiligen Komponenten berechnen. Dabei werden voraussichtlich folgende Betonarten zum Einsatz kommen:

1. Feinkörniges Betonsystem
2. Ultrahochfester Beton (UHPC)
3. Öko-Beton mit wenig Zement
4. Leichtbeton
5. Schwerbeton bzw. selbstverdichtender Beton (SVB)

Exemplarische Beispiele für eine mögliche Zusammensetzung von UHPC sind im Folgenden dargestellt. Die in diesem Projekt zu entwickelnden Rezepturen werden davon abweichen.

UHPC	Einheit	M 1	M 1Q	M 2Q	B 1	B 1Q	B 2Q	B 3Q	B4B
Zement	kg/m ³	900	733	832	800	630	723	580	700
Quarzsand 0,125/0,50 mm	kg/m ³	1016	1008	975	440	433	425	354	-
Basaltsand 0,125/0,50 mm	kg/m ³	-	-	-	-	-	-	-	462
Basalt 2/8	kg/m ³	-	-	-	870	867	850	711	800
Mikrosilica	kg/m ³	225	230	135	200	197	118	177	92
Stahlfasern 2,5 Vol.-%	kg/m ³	192	192	192	192	192	192	194	192
Quarz I	kg/m ³	-	183	207	-	158	181	325	-
Quarz II	kg/m ³	-	-	-	-	-	-	131	290
Vol.-% Feinststoff < 0,125 mm	l/m ³	387	405	403	344	350	350	439	381
Fließmittel	kg/m ³	28,2	28,6	29,4	25,0	24,7	25,6	30,4	27,0
Wasser	l/m ³	185	161	166	165	151	157	141	150
Wasser- Feststoff-Verh. ₁₎ (w/z) w/b	-	(0,23) 0,18	(0,24) 0,19	(0,22) 0,19	(0,23) 0,18	(0,27) 0,20	(0,24) 0,21	(0,28) 0,21	(0,24) 0,21
Vol.-% Wasser und Feinststoff < 0,125 mm	l/m ³	600	595	598	534	526	533	600	547

Abbildung 4.4: Mögliche Zusammensetzung von UHPC-Betonen. Quelle: E. Fehling et al. Forschungsbericht DFG FE 497/1-1. Structural Materials and Engineering Series. No. 1

AP 2.2 (IWB): Anschließend wird das IWB ein Suspensionsmischverfahren für Beton konzipieren, bei dem erstmals die flüssigen Komponenten und erst später der Zuschlag eingebracht wird. Dies soll die Agglomeration von reaktiven Zusatzstoffen oder Additiven wie Farbpartikeln verhindern und eine homogenere Durchmischung ermöglichen. Dazu wird die Forschungseinrichtung rezeptspezifische Algorithmen erarbeiten, nach denen die einzelnen Komponenten zugeben werden sollen. Voraussichtlich wird dies in einem mehrstufigen Prozess, wie in 4.1.2 beschrieben, stattfinden. In diesem Zusammenhang müssen die verschiedenen Komponenten, deren Konzentrationen und entstehende Wechselwirkungen in den einzelnen Referenzrezepturen berücksichtigt und die

Zugabereihenfolge gegebenenfalls abgeändert werden. Außerdem wird das IWB die Mischungsdauer und –Intensität der Phasen vorläufig definieren.

AP 2.3 (IWB): Um die Betonmischungen der verschiedenen Referenzrezepturen im Zusammenhang mit dem neuartigen Suspensionsmischverfahren untersuchen und rheologisch charakterisieren zu können, wird das IWB einen Versuchsaufbau konzipieren. Als Prüfstand wird dafür voraussichtlich der Labormischer KKM –RT 15/22,5 der Kniele GmbH zum Einsatz kommen (Abbildung 4.5). Dieser verfügt bereits über einen Mikrowellensensor zur Feuchtigkeitsbestimmung, jedoch nicht über einen Temperatursensor. Da die Temperatur eine relevante Einflussgröße bei der rheologischen Betrachtung ist, muss der Labormischer mit entsprechenden Sensoren nachgerüstet werden. Ebenso wird das IWB sicherstellen, dass die vorhandenen Mischwerkzeuge für die verschiedenen Rezepturen geeignet sind und damit vergleichbare Ergebnisse erzielt werden können.



Abbildung 4.5: Labormischer KKM –RT 15/22,5 der Kniele GmbH

AP 2.4 (IWB): Zur Realisierung einer möglichst effizienten Untersuchung der rheologischen Eigenschaften der Betonmischungen in den folgenden Arbeitspaketen, wird das IWB einen statistischen Versuchsplan (Design of Experiments, DoE) hinsichtlich der zu untersuchenden Parameter wie z. B. Mischdauer, Mischintensität oder Zugabereihenfolge der einzelnen Komponenten erarbeiten. Dabei kann mit vergleichsweise geringem Versuchsaufwand ein hoher Erkenntnisgewinn erreicht werden, indem aus den Messergebnissen eine Regressionsfunktion bestimmt wird, welche für den gesamten Versuchsraum gilt. Bei beispielsweise 5 Einflussfaktoren und Variation des Faktors auf drei Stufen (z. B. Mischungsdauer in Phase 1 bei 10 min, 20 min und 30 min) kann der Versuchsumfang im Vergleich zu anderen Methoden von 243 auf 27 verringert werden.

AP 2.5 (IWB): Anschließend sollen die Referenzrezepturen in dem Labormischer gemäß des statistischen Versuchsplans in mehreren Testreihen untersucht werden. Ziel ist hierbei die Ermittlung der Viskosität und der Fließgrenze in den einzelnen Phasen des Suspensionsmischverfahrens und in Abhängigkeit der verschiedenen Beton-Zusammensetzungen. Dazu wird eine Fließkurvenbestimmung durchgeführt. Das Mischgut wird mit vorgegebener Rotationsgeschwindigkeit UPM_{max} für beispielsweise 10 Sekunden vorgeschert, um thixotrope Effekte zu eliminieren. Nachfolgend wird die Rotationsgeschwindigkeit in 9 Stufen mit gleicher Stufenweite reduziert und das zugehörige Drehmoment mittels Frequenzumrichter erfasst. Die Berechnung der rheologischen Parameter dynamische Viskosität [Nm] und plastische Viskosität [Nm/min] erfolgt nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Die Berechnung der Fließgrenze kann über ein rheologisches Modell angenähert werden. 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. In Abbildung 4.6 ist beispielhaft eine Fließkurve dargestellt, aus der die Fließgrenzen extrapoliert werden können.

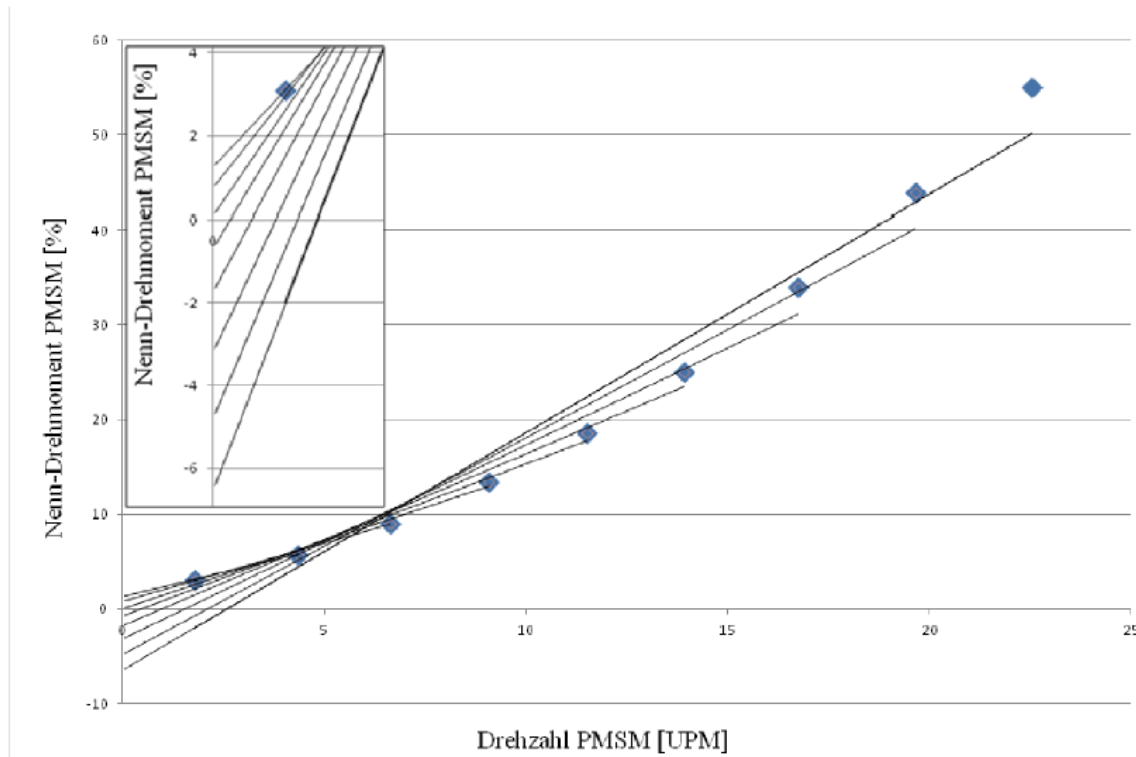


Abbildung 4.6: Fließkurve und daraus extrapolierte Fließgrenzen. Quelle: Dissertation C. Baumert. Rheometrische Mischprozessführung. TU Darmstadt. 2012.

AP 2.6 (IWB): In diesem Arbeitspaket wird das IWB die Betoneigenschaften nach dem Mischprozess bestimmen. Eine Übersicht der relevanten Parameter und Methoden ist im Folgenden dargestellt. Aus Zeit und Kostengründen werden voraussichtlich nicht alle dargestellten Prüfungen durchgeführt. Die relevanten Eigenschaften für das Projekt sind vor allem die Druck- und Zugfestigkeit, das Ausbreitmaß, die Erstarrungszeit, die Partikelagglomeration und die Verteilung der Agglomerate.

Art der Prüfung	Prüfkörper D/H bzw. L/B/H [mm]	Prüfalter/ Wechsel	Lagerung	Prüfung nach
Druckfestigkeit	Prismenhälfte 40x40 Zylinder 150/300	7, 28, 56, 180d bis 2a	a) Wasserlagerung bis Prüfung 20°C b) 2d 90°C danach Normklima 20/65r.F. bis Prüfung	DIN 1048
Zugfestigkeit	Prismen 160x40x40 gevoutete Zylinder 90/300	7, 28, 56, 180d bis 2a	a) Wasserlagerung bis Prüfung 20°C b) 2d 90°C danach Normklima 20/65r.F. bis Prüfung	DIN 1048
Biegezug-festigkeit	Prismen 160x40x40 Balken 700x150x150	7, 28, 56, 180d bis 2a	a) Wasserlagerung bis Prüfung 20°C b) 2d 90°C danach Normklima 20/65r.F. bis Prüfung	DIN 1048
Autogenes Schwinden	Zylinder 150/1500	ab 30 min	Lagerung bei 20°C	-
Trocknungs- schwinden	Zylinder 150/300	ab 2 Tage	Lagerung bei 20°C / 65% r.F.	DIN 1048 – Ergänzungen des DafStb []
Carbonatisierung	Zylinder 150/300 Balken 700x150x150	7, 28, 56, 90, 180 Tage bis 3 Jahre	a) Normklima 20/65r.F. b) im Freien ungeschützt	DIN 1048 – Ergänzungen des DafStb []
Sulfatangriff	Prismen 160x40x40	bis 90 Tage	Sulfatlösung 16,1g Na ₂ SO ₄ / 100ml Wasser	in Anlehnung an DIN EN 1367-2
Frost-Tausalz- Widerstand	Würfel 200x100x150	bis 112 F-T- Wechsel	a) Wasserlagerung bis Prüfung b) 2d 90°C danach Normklima 20/65r.F. bis Prüfung	CDF-Test nach Setzer []
Brandwiderstand	Zylinder 150/300	28d	a) bis 28.d Wasserlagerung danach 14d Normklima b) 2d 90°C danach Normklima 20/65r.F. bis Prüfung	DIN 4102-1
Dauerschwing- festigkeit bei Druckbeanspruchung	Zylinder 150/300	ab 28d	b) 2d 90°C danach Normklima 20/65r.F. bis Prüfung	-
Schub- und Biegetragverhalten	Bewehrte Balken 1900x180x200	28d	2d 90°C danach Normklima 20/65r.F. bis Prüfung	-

Abbildung 4.7: Prüfmethode zur Charakterisierung der Betoneigenschaften. Quelle: E. Fehling et al. Forschungsbericht DFG FE 497/1-1. Structural Materials and Engineering Series. No. 1

AP 2.7 (IWB): Parallel dazu wird das IWB Referenzmessungen mit dem herkömmlichen Mischverfahren, d. h. durch die Zugabe der groben Komponenten zuerst, gefolgt von den feinen bzw. flüssigen Bestandteilen, unter gleichen Bedingungen durchführen. Die dabei erhaltenen Ergebnisse dienen als Vergleichswerte mit dem Suspensionsmischverfahren, sodass die Qualitätsunterschiede des Betons während und nach dem Mischprozess, ebenso wie die Einsparungspotentiale an Energie und Material quantifizierbar werden.

AP 2.8 (IWB): In diesem Arbeitsschritt wird das IWB die erhaltenen Daten statistisch auswerten und signifikante Zusammenhänge zwischen dem neuartigen Suspensionsmischverfahren und den Betoneigenschaften ermitteln. Dabei soll z.B. quantifiziert werden, inwiefern sich der neue Mischprozess auf die Fließeigenschaften oder die Festigkeit des Betons auswirkt und wieviel Zement und Fließmittel eingespart werden können. Durch die generierten Erkenntnisse können das entwickelte Mischkonzept sowie die bestehenden Mischwerkzeuge validiert und Optimierungsbedarf identifiziert werden.

AP 3: Entwicklung von CFD-Simulationsmodellen zur Charakterisierung der Strömungsdynamik und Partikelagglomeration im Suspensionsmischverfahren (Novicos GmbH)

AP 3.1 (Novicos GmbH): Ziel des zu entwickelnden CFD Simulationsprogrammes ist die Charakterisierung der Strömungsdynamik und der Partikelagglomeration im Suspensionsmischverfahren. Als ersten Schritt wird die Novicos GmbH sämtliche relevanten Parameter, die es zu berücksichtigen gilt, definieren und gemäß des voraussichtlichen Einflusses auf den Mischprozess gewichten. Hierbei müssen z.B. vor allem die intermolekularen Wechselwirkungen der verschiedenen Partikel, ebenso wie deren Größe und Konzentration berücksichtigt werden. Einen weiteren relevanten Faktor stellt voraussichtlich die herrschende Temperatur dar. Für die Gewährleistung eines vertretbaren Arbeits- und Zeitaufwandes in den weiteren Arbeitsschritten ist es notwendig, bestimmte Parameter zu vernachlässigen oder konstante, nicht schwankende Werte anzunehmen.

AP 3.2 (Novicos GmbH): In diesem Arbeitsschritt wird die Novicos GmbH ein CFD-Simulationsmodell entwickeln (Modell 1), das eine erste grobe Abschätzung der Dissipation, der dynamischen Viskosität und von Totzonen in dem Suspensionsmischverfahren zulässt. Hierbei soll der „Volume Of Fluid“ (VOF) Ansatz zur Berechnung der freien Oberfläche, welche essentiell für die Beschreibung der Partikelbewegungen ist, verfolgt werden. Der Dichteunterschied zwischen dem zu betrachtenden Partikel und des umgebenden Fluides führt dazu, dass die Massenträgheitskraft vernachlässigt werden kann, dass also die Partikelbewegung „unabhängig“ oder „frei“ ist von der Massenträgheitskraft des Fluides. Unter der Annahme einer perfekten Mixtur kommt voraussichtlich ein rheologisches 1-Phasen-Modell nach Bingham oder Herschel-Bulkley zum Einsatz. Die Durchmischung der Suspension kann somit durch das Tracken von wenigen Marker-Partikeln abgeschätzt werden. In diesem ersten Simulationsmodell werden die Partikel zunächst noch als passiv bzw. nicht reaktiv angenommen. Das in diesem Arbeitspaket entwickelte Simulationsmodell kann außerdem für die Optimierung der Mischerwerkzeuge (AP 2.9) eingesetzt werden. Zur Erarbeitung des Simulationsmodells durch die Novicos GmbH werden voraussichtlich die Softwareprogramme OpenFOAM (Abbildung 4.7) oder Star-

CCM eingesetzt. Für die Charakterisierung der entstehenden Turbulenzen kommt URANS oder SAS zur Anwendung.

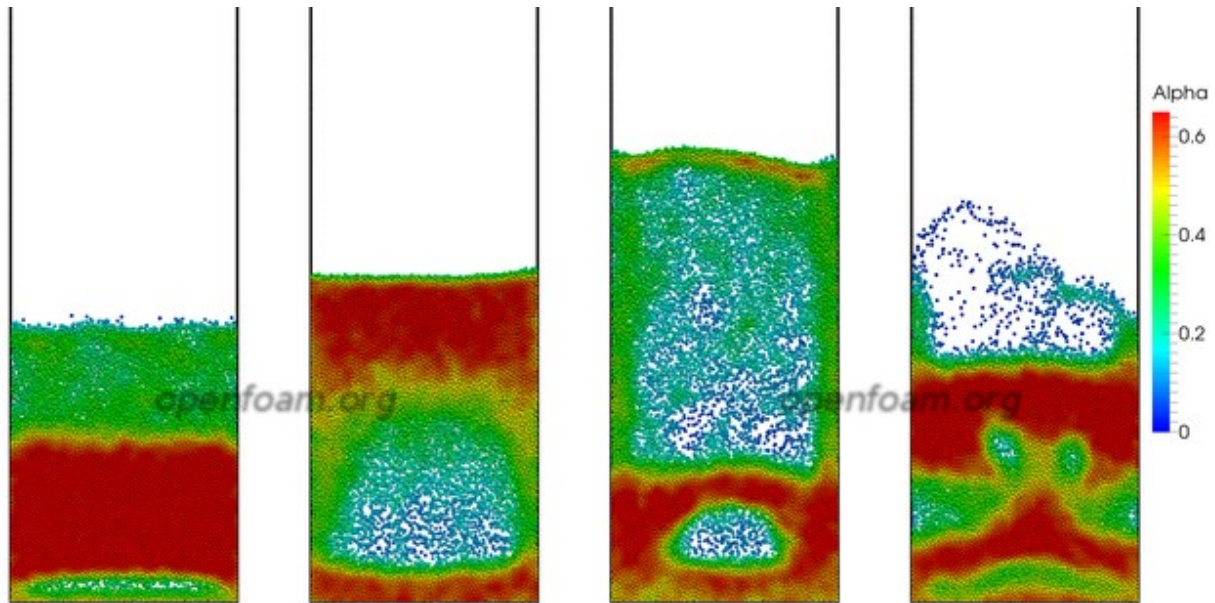


Abbildung 4.7: CFD-Simulation mittels OpenFOAM. Quelle: www.openfoam.org

AP 3.3 (Novicos GmbH): Im nächsten Schritt wird die Novicos GmbH ein weiteres Simulationsmodell (Modell 2) entwickeln, welches die Partikel als zweite, aktive Phase berücksichtigt, sodass eine direkte Berechnung der Durchmischung ermöglicht wird und der Einfluss der Partikel auf die Strömung gut abbildbar wird. Grundlage hierfür ist die Berechnung der wahrscheinlichen Partikel-Partikel- und Partikel-Fluid Interaktionen. Dies wird die Novicos GmbH mit Hilfe eine Multiphase particle-in-cell Ansatzes (MPPIC), der auch für hohe Partikeldichten geeignet ist, umsetzen. Dadurch wird das Modell 2 genauer als Modell 1, aber deutlich aufwendiger. Die MPPIC nutzt sowohl die Euler- (für das Fluid) als auch die Lagrangebetrachtungsweise (für die Partikel). Um nicht alle Partikel eines realen Systems abbilden zu müssen, nutzt die MPPIC numerische Partikel sodass mehrere, gleichwertige Partikel zusammengefasst werden können (Abbildung 4.8). Zur Berücksichtigung einer Fließgrenze wird das Unternehmen zudem ein rheologisches Modell mit nicht-linearem Solver integrieren. Die freie Oberfläche wird wie in Modell 1 mit dem VOF Ansatz berechnet. Sollte sich der MPPIC-Ansatz als nicht uneingeschränkt brauchbar herausstellen, wird das Unternehmen alternativ ein Star-CCM Multiphase Segregated Flow Modell mit Partikeln als zweiter Phase einsetzen.

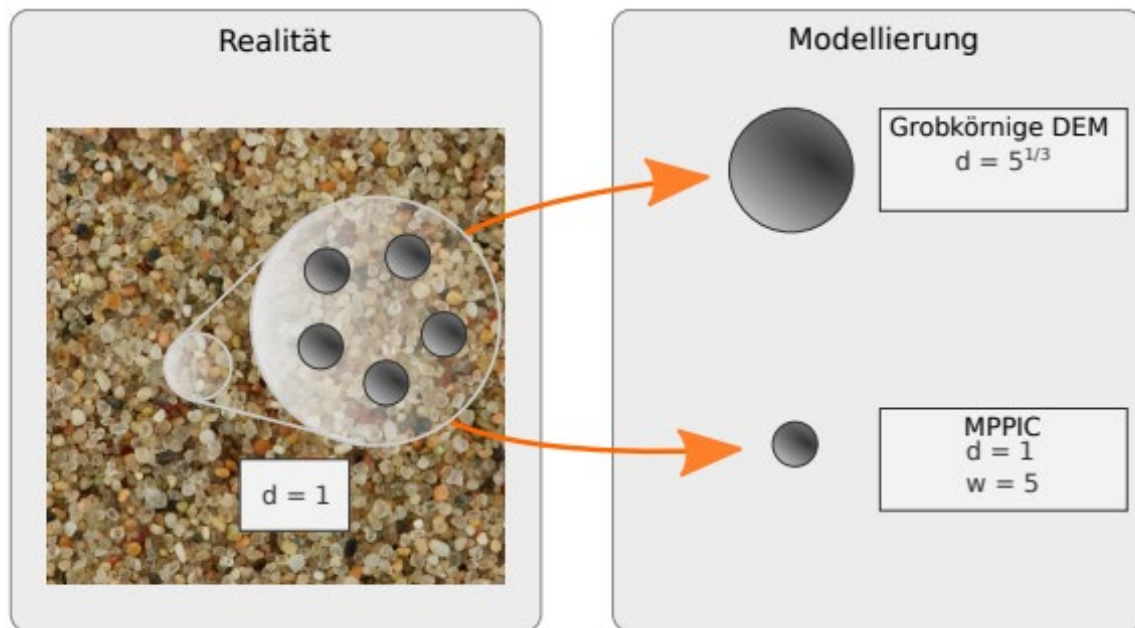


Abbildung 4.8: Numerische Partikel - Vergleich der Discrete Element Method (DEM) und MPPIC. Die MPPIC fasst reale Partikel mit gleichem Durchmesser d zu einem numerischen Partikel zusammen, welches ein größeres stochastisches Gewicht w hat. Quelle: www.mathcces.rwth-aachen.de

AP 3.4 (Novicos GmbH): Um die Partikelagglomeration im Suspensionsmischverfahren abbilden zu können, wird die Novicos GmbH die entwickelten Simulationsmodelle mit einem (Des-)Agglomerationsmodell erweitern. Dadurch kann vorhergesagt werden, ob die auftretenden Scherkräfte ausreichend sind, um eine Desagglomeration zu erreichen bzw. eine Agglomeration der Partikel von vornherein zu verhindern.

AP 3.5 (Novicos GmbH): In diesem Arbeitsschritt wird die Novicos GmbH ein gekoppeltes CFD-DEM Modell (Modell 3) entwickeln. Dabei wird die Discrete Element Method (DEM) miteinbezogen, sodass die mechanischen Eigenschaften der Partikel, deren Kopplung zum Fluid und die (Des-)Agglomeration umfassend und direkt abgebildet werden können. Dies ist jedoch mit extrem hohem Rechen- und Zeitaufwand verbunden, sodass eine Aufwandsreduzierung durchgeführt wird (AP 9.2). Das Modell 3 dient zum einen dazu, die Modelle 1 und 2 zu verifizieren und zu kalibrieren, zum anderen soll es zur Charakterisierung von hochviskosen Betonen herangezogen werden.

AP 3.6 (Novicos GmbH): Anschließend wird die Novicos GmbH die entwickelten Simulationsmodelle 1 und 2 ausführlich testen, quer-verifizieren und mit Hilfe des Modells 3 validieren. Außerdem werden die Simulationsergebnisse mit den von der Universität Stuttgart in Laborversuchen experimentell bestimmten Daten verglichen und die Genauigkeit der Modelle bestimmt. Daraus kann das Unternehmen den Optimierungsbedarf identifizieren und Kompensationsmöglichkeiten ableiten.

AP 3.7 (Novicos GmbH): Mit Hilfe der entwickelten Simulationsmodelle wird die Novicos GmbH die Strömungsdynamik und die daraus folgende Partikelagglomeration von Zementkomponenten und Farbpartikeln erforschen und soweit möglich quantifizieren. Dabei werden die relevanten Prozessparameter wie Partikelgröße, Partikelkonzentration, Wassergehalt oder Temperatur variiert und die Auswirkungen auf die interpartikulären Wechselwirkungen, die benötigte Mischdauer und letztendlich auf die Qualität des Mischprozesses untersucht. Die daraus erhaltenen Erkenntnisse

werden für die Entwicklung und Optimierung des Suspensionsmischverfahrens genutzt und tragen entscheidend zur Erreichung der angestrebten Vorteile bei.

AP 3.8 (IWB, Novicos GmbH): Auf Basis der CFD-Simulationen (AP 5) und der rheologischen Charakterisierung der Betonmischungen, werden die Kooperationspartner IWB und Novicos GmbH in enger Kooperation die Geometrien der Mischerwerkzeuge hinsichtlich der erreichbaren Scherrate, erzeugter Turbulenzen und Energieeintrag optimieren, sodass die Bildung von Partikelagglomeraten zusätzlich reduziert werden kann. Aus experimentellen Vorversuchen ging bereits hervor, dass sich der Einsatz von Stiftwirblern (Abbildung 4.9) positiv auf die Durchmischung auswirkt und die Mischdauer verkürzen kann. Dieser Ansatz soll im Zuge des Projektes mit Hilfe der CFD-Simulationen vertieft und ergänzt werden. Denkbar ist in diesem Zusammenhang die Anwendung einer Perforation, durch die zusätzliche Scherkräfte und Turbulenzen, insbesondere während der ersten Phase des Suspensionsmischverfahrens, erzeugt werden können. Diese muss gleichzeitig so gestaltet werden, dass die Werkzeuge vollständig gereinigt werden können und keine Betonrückstände die Poren verstopfen.



Abbildung 4.9: Stiftwirbler. Quelle: Dissertation C. Baumert. Rheometrische Mischprozessführung. TU Darmstadt. 2012.

AP 4: Entwicklung des neuartigen Suspensionsmischers und Herstellung eines Prototypen (Kniele GmbH)

AP 4.1 (Kniele GmbH): In einem ersten Schritt wird die Kniele GmbH sämtliche Komponenten des geplanten Schräglagenmischers wie z. B. Mischraum, Gehäuse, Verzweigungen, Verbindungseinrichtung auf Basis der Patentanmeldung konstruktiv auslegen. Dabei wird beispielsweise genau definiert, ob ein zylindrischer oder konus- bzw. kegelstumpfförmiger Mischbehälter zum Einsatz kommen soll. Ebenso wird die Kniele GmbH das Mischvolumen und die Zu- bzw. Ablauföffnungen spezifizieren und ausarbeiten. Eine besondere Herausforderung liegt in diesem Zusammenhang in der Konstruktion der Verschluss- und Dichtungstechnik sowie im Rührwerk selbst. Dabei soll eine Zentralschmieranlage zum Einsatz kommen, deren untere Lagerung voraussichtlich im Material liegt. Diese muss absolut dicht gestaltet werden, um Leckagen zu verhindern und den Mischprozess kontrollieren zu können.

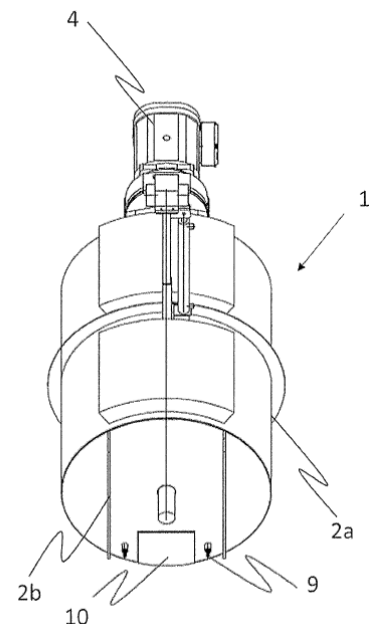


Abbildung 4.10: Skizze des angestrebten Schräglagenmischers in einer zylindrischen Ausführung. (1) Mischapparat (2a) Mantel (2b) Bodenplatte (4) Antrieb (9) Düse (10) Verschlussmittel

AP 4.2 (Kniele GmbH): Ein wesentlicher Faktor für den Erfolg des neuartigen Schräglagenmischers ist die Entwicklung bzw. Auslegung einer geeigneten Antriebstechnik hinsichtlich Leistung bzw. Energieeintrag, Steuerbarkeit und Genauigkeit. In diesem Zusammenhang soll vor allem die Anwendung eines Torquemotors (Abbildung

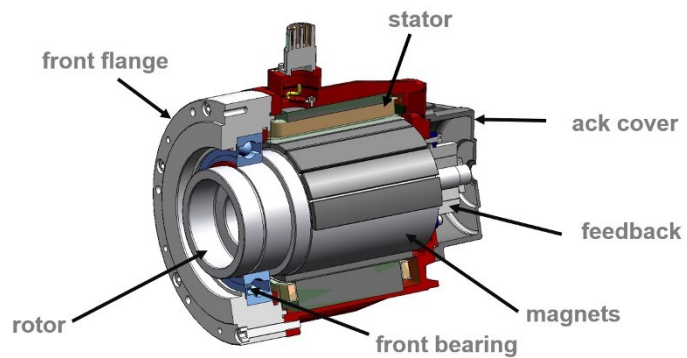


Abbildung 1.11: Torquemotor. Quelle: www.antrimon.com

4.11) untersucht werden. Durch die direkte Kopplung der Nutzlast an den Rotor entfällt die Notwendigkeit für mechanische Übertragungselemente wie Getriebe, Zahnriemen, Reduktionsgetriebe und Schneckengetriebe. Im Gegensatz zu bürstenbehafteten Motoren gibt es hier keinen Kontakt zwischen Rotor und Stator; daher gibt es keine mechanische Abnutzung, wodurch die Zuverlässigkeit und Lebensdauer erhöht werden soll. Durch die geringe Anzahl an mechanischen Teilen kann auch die Wartung minimiert und die Systemkosten reduziert werden. Zudem soll eine direkte Kopplung der Last- und Positionsrückmeldung an den Motor realisiert werden, sodass Langzeitdrift, Elastizität und Spiel reduziert werden können. Ein Nachteil des Torquemotors besteht jedoch in der relativ großen Hitzentwicklung bei hohen Leistungen und langer Antriebsdauer, was den Einsatz eines Kühlsystems notwendig macht. Genau darauf soll bei dem neuen Schräglagenmischer möglichst verzichtet werden können. Die Herausforderung für die Kniele GmbH besteht unter anderem darin, die Antriebstechnik so auszulegen, dass die benötigten Leistungen für das Suspensionsmischverfahren erreicht werden können, ohne dabei zu überhitzen. Dies soll beispielsweise durch einen gezielten Energieeintrag während der einzelnen Phase des Suspensionsmischverfahrens und der spezifischen Abstimmung auf verschiedene Rezepturen erreicht werden.

AP 4.3 (Kniele GmbH): In diesem Arbeitspaket wird die Kniele GmbH geeignete Werkstoffe für die für die einzelnen Komponenten des neuartigen Mischsystems bestimmen. Aufgrund der hohen mechanischen Belastung kommt für die Mischwerkzeuge voraussichtlich eine widerstandsfähige Eisenlegierung bzw. Edelstahl in Frage. Für die weniger stark belasteten Komponenten oder Einzelteile, die nicht direkt mit der Betonmischung in Kontakt stehen, ist jedoch auch der Einsatz von leichteren Materialien wie Aluminium denkbar. Für die Abstreifer ist der Einsatz von elastischen Kunststoffen geplant, welche die Betonmischung vollständig von der Innenseite des Mixers entfernen können. So kann zusätzlich Gewicht und Material eingespart werden.

AP 4.4 (Kniele GmbH): Nach der konstruktiven Auslegung und Detaillierung sämtlicher Komponenten des neuartigen Schräglagenmischers, wird die Kniele GmbH die einzelnen Anlagenteile fertigen. Dazu steht dem Unternehmen ein umfangreiches Technikum für die Metallverarbeitung zur Verfügung. Anschließend werden die Bauteile in das Gesamtsystem integriert und der erste Prototyp des innovativen Schräglagenmischers hergestellt. Dies schließt die verbesserten Mischwerkzeuge mit ein.

AP 4.5 (Kniele GmbH): Im späteren Einsatz beim Kunden soll die Dosierung der einzelnen Beton-Komponenten automatisch geregelt werden, sodass in Abhängigkeit der jeweiligen Phasen des Suspensionsmischverfahrens die Rezepturbestandteile gezielt und genau zugegeben werden können. Dazu wird die Kniele GmbH in diesem Arbeitsschritt eine Dosierungstechnik in den Prototyp des Schräglagenmischers implementieren. Neben Pumpen und einem Wägsystem für Zuschlagstoffe, Bindemittel, Wasser und Zusatzmittel, kommen für die exakte Dosierung der Komponenten

voraussichtlich Dosierschlüsse, je nach Gewichtanteil mit Grob- oder Grob-/Feindosierung zum Einsatz. Alternativ sind auch Dosierbänder oder Vibrationsrinnen denkbar.

AP 4.6 (Kniele GmbH): Während des Mischprozesses soll der Zustand bzw. die rheologischen Eigenschaften der Betonmischung in Echt-Zeit überwacht und geregelt werden können. Dazu soll ein Condition Monitoring System entwickelt (AP 4) und in den neuartigen Mischer integriert werden. Dafür wird die Kniele GmbH sämtliche notwendigen Modifikationen durchführen. Dies schließt z. B. Zugangsbohrungen für Sensoren und Elektrik oder den Einbau von Frequenzumrichtern zur Erfassung der Motorleistung mit ein. Dieser Arbeitsschritt basiert zum einen auf dem zu entwickelnden Platzierungskonzept durch die Bikotronic GmbH, zum anderen dürfen konstruktiven Änderungen den Mischprozess nicht negativ beeinflussen, wobei die Herausforderung in der Vermeidung von Toträumen oder schwer reinigbaren Nischen besteht.

AP 4.7 (Kniele GmbH): Anschließend wird die Kniele GmbH in ersten Testreihen die technische Funktionalität des neuartigen Schräglagenmischers bestätigen (Proof of Process) und auftretende konstruktive Mängel beseitigen. Sollte sich dabei herausstellen, dass z. B. eine zylindrische Bauweise des Mischers unvorhergesehene Probleme verursacht, wird die Kniele GmbH die Geometrien überarbeiten und gegebenenfalls durch eine konusförmige Mischerform ersetzen. Auf diese Weise wird in einem iterativen Prozess die konstruktive Auslegung des Schräglagenmischers optimiert.

AP 4.8 (Kniele GmbH): Zur Validierung der Konstruktionsabläufe des neuartigen Schräglagenmischers wird die Kniele GmbH eine Fehlermöglichkeiten- und -einflussanalyse (FMEA) durch. Dabei wird der Konstruktionsprozess hinsichtlich Zuverlässigkeit, Effizienz und Auftretens- bzw. Entdeckungswahrscheinlichkeiten von Produktfehlern untersucht. Dies ist insbesondere für die Verschluss- und Antriebstechnik sowie die Schmieranlage und Dichtigkeit sämtlicher Komponenten des Schräglagenmischers relevant. Die aus den Fehlern entstehenden Risiken werden bewertet und anschließend Gegenmaßnahmen zu deren Vermeidung entwickelt. Die mit der FMEA erzielte Qualitätssteigerung senkt die Gefahr, dass Produktfehler beim Kunden auftreten und damit Kosten und ein Ansehensverlust entstehen. Dem höheren Aufwand zu Beginn der Prozessentwicklung steht die Vermeidung von späteren Fehlern gegenüber. Weitere Vorteile des FMEA-Einsatzes sind die Steigerung des Qualitätsbewusstseins der Mitarbeiter sowie die geordnete und lückenlose Dokumentation der Fehler und Gegenmaßnahmen.

AP 5: Entwicklung eines Condition Monitoring Systems zur Überwachung des Suspensionsmischverfahrens (Bikotronic GmbH)

AP 5.1 (Bikotronic GmbH): In einem ersten Arbeitsschritt wird die Bikotronic GmbH den genauen Aufbau des zu entwickelnden Condition Monitoring Systems zur Zustandsüberwachung der Betonmischung im mehrstufigen Suspensionsmischverfahrens in Echtzeit detaillieren. Dabei werden die benötigten Genauigkeiten der zu überwachenden Parameter für die spätere Daten-Referenzierung definiert und besonders relevante Bereiche innerhalb des Schräglagenmischers unter Berücksichtigung von dessen Maße und Geometrien festgelegt. Die wesentlichen Parameter in diesem Zusammenhang sind Temperatur, Feuchte bzw. WZ-Wert sowie Motorleistung bzw. Drehzahl zu Bestimmung der Betonkonsistenz. Dabei werden auch die voraussichtlichen Bestandteile der verschiedenen Rezepturen und die einzelnen Phasen des Mischverfahrens berücksichtigt. Beispielsweise ist es denkbar, dass zu Beginn des Mischverfahrens die genaue Bestimmung des Wassergehalts nur eine untergeordnete Rolle spielt, die exakte Erfassung der Restfeuchte gegen Ende des Mischprozesses

jedoch essentiell für die Qualität des Betons ist. Die innovative Herausforderung während der Entwicklung besteht vor allem darin, dass das Condition Monitoring System für die spezifischen Anforderungen des Suspensionsmischverfahrens und des neuartigen Mischsystems konzeptioniert werden muss. Beispielsweise muss die Schräglage des Mischbehälters im Zusammenhang mit dessen Geometrie (z. B. konisch oder zylindrisch) und der daraus folgenden Betonverteilung innerhalb des Mixers berücksichtigt werden. Eine einfache Übertragung der Überwachungs- und Regelsysteme von herkömmlichen Anlagen und Mischverfahren ist nicht möglich, sodass hier enormer Entwicklungsbedarf besteht.

AP 5.2 (Bikotronic GmbH): Anschließend wird die Bikotronic GmbH auf Basis des entwickelten Konzeptes die vorläufige Art und Anzahl der benötigten Sensoren zur Erfassung der relevanten Parameter bestimmen. Neben Temperatursensoren (Abbildung 4.12) werden zur Bestimmung der Feuchte voraussichtlich Mikrowellensonden zum Einsatz kommen. Dabei kommen vor allem die Mikrowellensonden Typ 6P, die aus der eigenen Entwicklung der Bikotronic GmbH stammen, in Frage (Abbildung 4.13), da diese für alle Konsistenzbereiche einsetzbar sind. Die Konsistenz der Betonmischung soll durch den Widerstand der Mischung bzw. anhand der benötigten Motorleistung bestimmt werden können. Um dies zu realisieren, müssen der Motorstrom und die Drehzahl erfasst werden können.



Technische Daten

- ✓ Spannungsversorgung: 12-24 V DC
- ✓ Ausgang: 4-20 mA, 0-10 V DC
- ✓ Messbereich: 0 - 100 °C
- ✓ Grenzwertalarm mit Ausgang
- ✓ Maße Sonde: Länge 125 mm, Durchmesser 25 mm
- ✓ Schutzklasse: IP65

Abbildung 4.12: Temperatursonde der Bikotronic GmbH

Typ 6P Mikrowellensonden für Teller-, Konusmischer, Ein- und Doppelwellenmischer



Messfrequenz: 300-500 MHz
Messbereich: Alle Konsistenzbereiche
Temperaturbereich: 0 bis + 60 °C
Ausgang: 0-20 mA, 0-10 V DC
Spannungsversorgung: 18-24 V DC

Sondengröße:
Durchmesser 105 mm, Länge 100 mm

Größe Sondenhalter:
Durchmesser 150 mm, Höhe 35 mm

Abbildung 4.13: Mikrowellensonde der Bikotronic GmbH zur Feuchtigkeitsbestimmung

AP 5.3 (Bikotronic GmbH): Die Konsistenz des Betons während des Mischprozesses soll voraussichtlich anhand des auftretenden Widerstandes, welcher dem Rührwerk bzw. dem Antrieb entgegenwirkt, abgeleitet werden. Je höher der Widerstand, desto höher ist die Viskosität bzw. die Zähflüssigkeit der Betonmischung. Dies soll durch die Erfassung der Leistungsparameter des eingesetzten Motors wie z.B. Drehzahl und Motorstrom umgesetzt werden. Dazu wird die Bikotronic GmbH, aufbauend auf den Erkenntnissen des IWB, die mathematischen Zusammenhänge zwischen Motorleistung und Konsistenz der Betonmischung erarbeiten, sodass diese zu jedem Zeitpunkt des Mischprozesses berechnet und für das Regelungssystem genutzt werden kann.

AP 5.4 (Bikotronic GmbH): Für die exakte Erfassung der Zustandsparameter und die anschließende Regelung spielt die Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit der ermittelten Sensordaten eine wichtige Rolle. In diesem Zusammenhang ist die gezielte Platzierung der einzelnen Sensoren innerhalb des neuartigen Mischers von großer Bedeutung. Deshalb wird die Bikotronic GmbH ein Platzierungs- und Halterungskonzept für die Sensorik erarbeiten. Dabei müssen beispielsweise der Bewegungsradius der Mischerwerkzeuge und der Abstreifer beachtet werden, damit keine Schäden an den Sensoren entstehen. Darüber hinaus dürfen die Temperatur- und Mikrowellensonden nicht in einem Totraum liegen und müssen gut reinigbar sein. Ebenso beeinflusst der voraussichtlich Füllgrad des Mischbehälters die Platzierung der Sonden innerhalb des Mischraums. Die Mikrowellensonde könnte bei einem zylindrischen Mischraum in den Boden eingelassen werden (Abbildung 4.14). Bei einem konischen Behälter müsste die Sonde voraussichtlich in die Wandung integriert werden.



Abbildung 4.14: In den Boden eines Betonmischers eingelassene Mikrowellensonde

AP 5.5 (Bikotronic GmbH): Da es sich bei dem angestrebten Condition Monitoring System um eine hochsensible Sensorik handelt, unterliegen die Sonden verschiedenen Einflüssen, welche die Genauigkeit und Aussagekraft der Messdaten beeinflussen. Dabei handelt es sich z.B. um die Anwesenheit von Eisen, was sich negativ auf die Mikrowellensonden auswirkt, eine zu geringe Anfangsviskosität, welche einen nicht über den auftretenden Rührwerkwiderstand erfasst werden kann, oder die Zugabe von grobem Zuschlag, welcher die Sensoren beschädigen kann. Deshalb wird die Bikotronic GmbH eine detaillierte Risikobeurteilung sämtlicher Störeinflüsse erarbeiten, den jeweiligen Phasen des Suspensionsmischverfahrens sowie verschiedenen Rezepturen zuordnen und mögliche Strategien zur Kompensation erarbeiten. Z. B. besteht die Gefahr einer Schädigung der Sensorik durch Steinschlag eher bei grobkörnigen Betonen mit hohem Anteil an Zuschlag.

AP 5.6 (Bikotronic GmbH): In diesem Arbeitsschritt wird das Unternehmen das entwickelte Condition Monitoring System mit sämtlichen Sensoren, der benötigten Elektrik und Verkabelung in den neuartigen Schräglagenmischer integrieren.

AP 5.7 (Bikotronic GmbH): Zur Übertragung der gemessenen Sensordaten an das zu entwickelnde Regelungssystem wird die Bikotronic GmbH eine Schnittstelle entwerfen und implementieren, sodass die Sensordaten für die Regelung weiter verarbeitet werden können.

AP 5.8 (Bikotronic GmbH): Nach Integration der Sensorik in den neuartigen Mischer wird die Bikotronic GmbH in diesem Arbeitsschritt das entwickelte Condition Monitoring System zur Quantifizierung der Betoneigenschaften validieren. Dazu wird in verschiedenen Testreihen die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Sensoren überprüft und Optimierungsbedarf identifiziert. Anschließend wird das Unternehmen die optimalen Messpunkte spezifizieren und die genaue Platzierung der einzelnen Sensoren gegebenenfalls anpassen. Beispielsweise kann sich im Zuge der Testmessungen herausstellen, dass der Temperatursensor an der ursprünglich angedachte Platzierung durch die Strömungsverhältnisse im Suspensionsmischverfahren negativ beeinflusst wird und stark schwankende Messwerte liefert. In diesem Fall muss die Sonde versetzt werden.

AP 5.9 (Bikotronic GmbH): Um eine aussagekräftige Zustandsüberwachung der Betonmischung in Echtzeit zu erhalten, reicht die bloße sensorische Erfassung der relevanten Parameter nicht aus.

Beispielsweise soll die Konsistenz der Mischung über deren Widerstand bzw. die benötigte Motorleistung zu dessen Überwindung bestimmt werden. Für die exakte Bestimmung der dynamischen Viskosität sind jedoch weitere Faktoren wie z. B. die herrschende Temperatur zu berücksichtigen und in Zusammenhang zu setzen. Als Grundlage für die zielgerichtete Regelung des Suspensionsmischverfahrens in den einzelnen Phasen wird die Bikotronic GmbH deshalb in diesem Arbeitsschritt eine intelligente Referenzierung der gemessenen Sensordaten vornehmen. Dabei müssen zudem in Abhängigkeit der Positionierung der Sensoren etwaige Temperatur-Feuchtigkeitsgradienten innerhalb der Mischung berücksichtigt werden.

AP 5.10 (Bikotronic GmbH): Auf Basis der bisherigen Erkenntnisse wird die Bikotronic GmbH die Sensoren für die benötigten Genauigkeiten in den jeweiligen Phasen des Suspensionsmischverfahrens kalibrieren. Darüber hinaus wird das Unternehmen ein Konzept zu Energieeinsparung entwickeln, bei dem die benötigten Sensoren nur dann eingesetzt werden sollen, wenn sie auch tatsächlich benötigt werden. Beispielsweise spielt voraussichtlich in der ersten Phase des innovativen Mischprozesses die Bestimmung der Feuchtigkeit nur eine untergeordnete Rolle, da hier die überwiegend flüssigen Komponenten zugegeben werden und der WZ-Wert gegebenenfalls so hoch sein wird, dass die Mikrowellensonden ohnehin keine aussagekräftigen Daten liefern kann. Dementsprechend könnte der Feuchtigkeitssensor zu diesem Zeitpunkt geschont, bzw. nicht eingeschaltet werden. In der letzten Phase des Mischverfahrens spielt die Kenntnis über den exakten Feuchtegehalt dagegen eine sehr große Rolle, da hier der angestrebte WZ-Wert eingestellt werden soll und dies direkten Einfluss auf die Betonqualität hat. Die Mikrowellensonde kann in Abhängigkeit der Betonrezeptur erst später zugeschaltet werden. Auf diese Weise soll der Energieverbrauch durch das Condition Monitoring System reduziert und durch die Belastungsdauer der einzelnen Sensoren reduziert werden.

AP 6: Scale Up und Optimierung des mehrstufigen Suspensionsmischverfahrens (IWB)

AP 6.1: (IWB) Bisher wurde das Suspensionsmischverfahren nur anhand eines relativ kleinen Mischvolumens entwickelt und im Labormaßstab untersucht. Ziel ist des Projektes ist jedoch die flexible Anwendung des Verfahrens im industriellen Maßstab mit zu bewältigenden Mischvolumina von bis zu 20 m³. Deshalb wird das IWB einen Scale Up des entwickelten Verfahrens durchführen und in diesem Zusammenhang für jede Referenzrezeptur die Mengen anpassen und gegebenenfalls die Zugabereihenfolge verändern oder weiter unterteilen. Bei einem Zuschlag von gegebenenfalls mehreren hundert Kilogramm kann es beispielsweise sinnvoll sein, die Gesteinskörnung in mehreren Schritten zuzugeben und dazwischen relativ kurze Mischphasen anzusetzen. Dieses Vorgehen wird sich insbesondere an den Geometrien und möglichen Mischvolumina des neuartigen Schräglagenmischers der Kniele GmbH orientieren und die Erkenntnisse der CFD-Simulationen berücksichtigen, sodass eine minimale Partikelagglomeration und Mischdauern erreicht werden kann.

AP 6.2 (IWB): Anschließend wird das IWB analog zu AP 2.5 das Suspensionsmischverfahren im industriellen Maßstab anhand von experimentellen Versuchsreihen im Schräglagenmischer validieren und rheologisch charakterisieren. Dabei wird die Forschungseinrichtung die Mischqualität hinsichtlich homogener Verteilung der einzelnen Komponenten sowie benötigter Mischdauer untersuchen und in Zusammenhang mit den Laborergebnissen setzen, sodass ein direkter Vergleich möglich ist und Optimierungsbedarf identifiziert werden kann.

AP 6.3 (IWB): In diesem Zusammenhang wird das IWB auch den Einfluss der entwickelten Mischwerkzeuge im Vergleich zu den bisherigen Geometrien untersuchen und quantifizieren. Als

relevante Größen könnte hierbei die benötigte Mischdauer zur Erreichung eines definierten Durchmischungsgrades oder der hierfür benötigte Energieeintrag bzw. die Motorleistung dienen. Dies wird zudem im Kontext mit den verschiedenen Betonrezepturen betrachtet, sodass signifikante Unterschiede im Hinblick auf die Einsatzmöglichkeiten der Mischwerkzeuge abgeleitet werden können.

AP 6.4 (IWB): Im Anschluss an die Versuchsreihen im neuartigen Schräglagenmischer werden die Eigenschaften der produzierten Betonmischungen unter den gleichen Bedingungen wie in AP 2.6 quantifiziert. Die wichtigsten zu bestimmenden Parameter in diesem Zusammenhang sind das Ausbreitmaß, die Festigkeit, die Partikelagglomeration und Partikelverteilung. Dadurch können die Betoneigenschaften nicht nur während des Suspensionsmischprozesses, sondern auch danach mit den Ergebnissen im Labormaßstab verglichen werden und signifikante Abweichungen festgestellt werden.

AP 6.5 (IWB): In diesem Arbeitspaket wird das IWB für die verschiedenen Referenzrezepturen, Mischphasen und Mischwerkzeuge das jeweils optimale Zeit-Energieeintrag-Profil für das Suspensionsmischverfahren erarbeiten. Dies ermöglicht zu jedem Zeitpunkt eine homogene Durchmischung der Betonkomponenten, die ausreichend ist, um eine Partikelagglomeration zu verhindern und gleichzeitig den hierfür benötigten Energieaufwand minimiert, sodass bis zu 10 % an Stromkosten im Vergleich zu bisherigen Verfahren eingespart werden können.

AP 6.6 (IWB): Auf Basis sämtlicher bisheriger Erkenntnisse und Entwicklungen wird die Forschungseinrichtung das entwickelte Suspensionsmischverfahren im industriellen Maßstab validieren und in iterativen Schritten optimieren, bis die angestrebten Prozessparameter hinsichtlich Mischdauer, Homogenität, Materialbedarf, Partikelagglomeration und -verteilung sowie Energieeintrag erreicht werden können. Dabei werden der jeweils optimale Zugabezeitpunkt sowie die exakten Dosierungsmengen der einzelnen Komponenten tiefergehend spezifiziert.

AP 7: Optimierung des neuartigen Schräglagenmischers

AP 7.1 (Kniele GmbH): Um technische und funktionelle Limitierungen des neuartigen Schräglagenmischers zu bestimmen und eine anwendungsgerechte Bedienung der Anlage gewährleisten zu können, wird die Kniele GmbH die Systemgrenzen der Entwicklung erforschen. Dazu wird das Unternehmen Belastungstest durchführen und Grenzwerte für die zulässigen Betriebsparameter bestimmen. Ein konkretes Ergebnis könnte beispielsweise sein, dass eine bestimmte Füllhöhe in Abhängigkeit der Schräglage des Mixers oder der Drehzahl des Rührwerks nicht überschritten werden darf, um eine umfassende Durchmischung zu erreichen. Zudem sollen Material- und Motorschäden infolge von zu hohen Belastungen vermieden werden können.

AP 7.2 (Kniele GmbH): In einem weiteren Schritt wird die Kniele GmbH den auftretenden Verschleiß und die Lebensdauer des neuartigen Schräglagenmischers sowie der Werkzeuge und Abstreifer untersuchen. Anhand von Langzeittest, in denen der Mischer z. B. über mehrere Stunden hinweg und unter extremen Bedingungen dauerbelastet wird, kann das Unternehmen die auftretenden Verschleißerscheinungen an den einzelnen Komponenten erfassen und basierend auf den Untersuchungen die zulässige Einsatzdauer extrapolieren. Dabei kann sich beispielsweise herausstellen, dass ein verbessertes Mischwerkzeug zwar eine homogenere Verteilung der Partikel erzeugen kann, aber derart verschleißanfällig ist, dass es in relativ kurzen Abständen ausgetauscht werden muss und daher für den praktischen Einsatz nicht in Frage kommt.

AP 7.3 (Kniele GmbH): Auf Basis der vorhergehenden Arbeitsschritte wird die Kniele GmbH ein Konzept entwickeln, welches den gezielten Einsatz der verbesserten Mischwerkzeuge für spezifische Betonrezepturen ermöglicht. Dabei wird voraussichtlich ein Set an Grundmodulen bestimmt, die sich als Allrounder für annähernd alle Betonarten eignen, aber dabei voraussichtlich nicht das mögliche Maximum an Durchmischung erreichen können. Gleichzeitig werden Konfigurationen identifiziert, die sich z.B. für spezielle Hochleistungsbetone wie UHPC besonders gut eignen, aber für andere Betontypen signifikant schlechtere Ergebnisse erzielen können. Dies ermöglicht der Kniele GmbH die flexible und anwendungsspezifische Auslegung des Schräglagenmischers für die jeweiligen Kundenanforderungen.

AP 7.4 (Kniele GmbH): In Folge der Belastungs- und Langzeittest, mit denen der Mischer validiert wird, kann die Kniele GmbH eine Weiterentwicklung bzw. Anpassung der Anzahl und Form der Abstreifer unter Berücksichtigung der Mischergeometrien und des Suspensionsmischverfahrens durchführen, sodass Ablagerungen und Toträume an der Mischerinnenwand verhindert werden können. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Sensorik, wie z. B. die Mikrowellensonde nicht beeinträchtigt oder sogar beschädigt werden. Entscheidend hierfür ist vor allem, ob bzw. mit welchem Druck die Abstreifer sich über die Mischerinnenwand bewegen sollen oder wie dicht diese anliegen. Abbildung 4.15 sind mögliche Formen von Abstreifern dargestellt. Darüber hinaus wird die benötigte Drehzahl der Abstreifer, die für einen reibungslosen Prozessablauf nötig ist, spezifiziert.



Abbildung 4.15: Verschiedene Geometrien für Abstreifer. Quelle: www.rwev.de

AP 7.5 (Kniele GmbH): Außerdem wird die Kniele GmbH den tatsächlich benötigten Energiebedarf des Schräglagenmischers und des Suspensionsmischverfahrens in den einzelnen Phasen mit Hilfe von Strommessgeräten erfassen. Dies dient zum einen zur Entwicklung der optimalen Zeit-Energieeintrag Profile in AP 6.5, zum anderen kann die Effizienz der Entwicklung mit herkömmlichen Anlagen direkt verglichen werden.

AP 7.6 (Kniele GmbH): Ein wichtiger Faktor bei dem Betrieb eines Betonmischers ist die schnelle und umfassende Reinigung, insbesondere dann, wenn während der Produktion unterschiedliche Produkte hergestellt werden müssen, z.B. bei einem Wechsel von farbigen Produkte oder zwischen Beton und Mörtel. Schon wenige Rückstände der vorherigen Mischung können schlimmstenfalls die aktuelle Charge unbrauchbar machen. Deshalb wird die Kniele GmbH ein automatisches Reinigungssystem für den neuartigen Schräglagenmischer entwickeln. Dieses wird



Abbildung 4.16: Drehkopf einer Reinigungsanlage für Betonmischer

voraussichtlich aus folgenden wesentlichen Komponenten bestehen:

- einfahrbare Reinigungslanze
- drehbare Reinigungsköpfe (Abbildung 4.16)
- Gegebenenfalls Einsatz von Dreckfräsen
- einschwenkbarer Auffangtrichter für das Reinigungswasser
- RC-Anlagen für das Waschwasser, einschl. Rührwerk und Schmutzwasserpumpe

AP 7.7 (Kniele GmbH): Ein wesentlicher Aspekt, auf dem die verbesserte Durchmischung des innovativen Systems beruhen soll, ist ein periodischer Wechsel der Antriebsrichtung des Rührwerks. Durch diesen Wechsel soll das gesamte Material noch umfassender bewegt und der Mischeffekt dadurch verstärkt werden, dass das Material in einer Drehrichtung an die untere Wandung gedrückt wird, in der anderen Drehrichtung aber unter anderem durch Abstreifer zurück in Richtung der eigentlichen Mischvorrichtung gefördert wird. Somit erfolgt der Transport des Mischgutes aufgrund der Schrägstellung des Mischbehälters sowie des gegenläufigen Betriebs des Mischwerkzeugs. Um diesen Effekt weiter zu erhöhen, wird die Kniele GmbH ein Konzept entwickeln, wann und in welchem Umfang dieser Wechsel der Drehrichtung während des Suspensionsmischverfahrens eingesetzt werden kann bzw. soll. Auf Basis der bisherigen Erkenntnisse wird die Kniele GmbH in Abhängigkeit der Betonrezepturen den Zeitpunkt die Dauer der Umschaltung bestimmen und entsprechende Protokolle erarbeiten, die in der Regelung der Anlage berücksichtigt werden sollen.

AP 8: Entwicklung einer SPS und eines Wartungssystems für den Suspensionsmischer

AP 8.1 (Bikotronic GmbH): Auf Basis der bisher gewonnenen Erkenntnisse wird die Bikotronic GmbH in diesem Arbeitsschritt die tatsächlich benötigte Sensorikausstattung für das Condition Monitoring System detaillieren, sodass der apparative Aufwand minimiert werden kann. Beispielsweise kann sich herausstellen, dass die Temperatur für die rheologische Charakterisierung der Betonmischungen während des Mischprozesses im Labormaßstab ein relevanter Faktor ist, im realen Schräglagenmischer jedoch nur eine untergeordnete Rolle spielt, auf die späteren Betoneigenschaften keinen signifikanten Einfluss besitzt und deshalb vernachlässigt werden kann. Dementsprechend könnte auf einen Temperatursensor in der praktischen Anwendung verzichtet werden.

AP 8.2 (Bikotronic GmbH): In diesem Arbeitsschritt wird die Bikotronic GmbH die Einflüsse des Suspensionsmischverfahrens auf das Condition Monitoring System hinsichtlich Messgenauigkeit und Verschleißerscheinungen, welche im Zuge von Turbulenzen oder Kollisionen von Gesteinspartikeln mit den Sensoren entstehen, untersuchen. Während der experimentellen Versuche durch das IWB (AP 6), wird die Bikotronic GmbH die erhaltenen Sensordaten auswerten und hinsichtlich Abweichungen in Abhängigkeit der Einsatzdauer analysieren. Daraus kann das Unternehmen notwendige Kalibrierungsintervalle für das Condition Monitoring System in Zusammenhang mit dem neuartigen Suspensionsmischverfahren ableiten.

AP 8.3 (Bikotronic GmbH): Für die Erreichung einer hohen Betonqualität und Einsparung von Zusatzmitteln durch das neuartige Verfahren im Schräglagenmischer, ist die exakte Dosierung der einzelnen Betonkomponenten wie Zement oder Fließmittel notwendig. Insbesondere die exakte Einstellung des Feuchtigkeitsgehalts in der letzten Phase des Suspensionsmischverfahren ist entscheidend und darf nicht mehr als 1 % vom Sollwert abweichen, um die Betonqualität nicht zu gefährden. Die Zuführung der verschiedenen Bestandteile soll dabei automatisiert geschehen. Dazu

wird die Bikotronic GmbH eine Wiege- und Zugabesteuerung entwickeln, welche die automatisierte Zuführung der verschiedenen Bestandteile ermöglicht.

AP 8.4 (Bikotronic GmbH): Ein Ziel des Projektes ist die exakte Regelung und Steuerung des innovativen Suspensionsmischverfahrens auf Basis der rheologischen Charakterisierung und Echtzeit-Zustandsüberwachung der Betonmischung durch das Condition Monitoring System. Dazu wird die Bikotronic GmbH eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) entwickeln, welche die ermittelten Grenzwerte hinsichtlich Energieeintrag, Motorleistung, Konsistenz, Viskosität und Feuchtegehalt der Betonmischung berücksichtigt. Wird z. B. der ideale bzw. angestrebte WZ-Wert von beispielsweise 0,5 während einer der Phasen des Mischverfahrens unterschritten, muss das Regelungssystem dazu in der Lage sein, die benötigte Wassermenge in Abhängigkeit des Mischvolumens automatisch zu berechnen und zu dosieren. Die Herausforderung besteht vor allem darin, dass sämtliche Regelungsschritte speziell für das Suspensionsmischverfahren

konzipiert werden müssen. Eine Übernahme bisher verfügbarer Systeme ist deshalb nicht möglich. Das angestrebte Vorgehen ist in Abbildung 4.17 dargestellt.

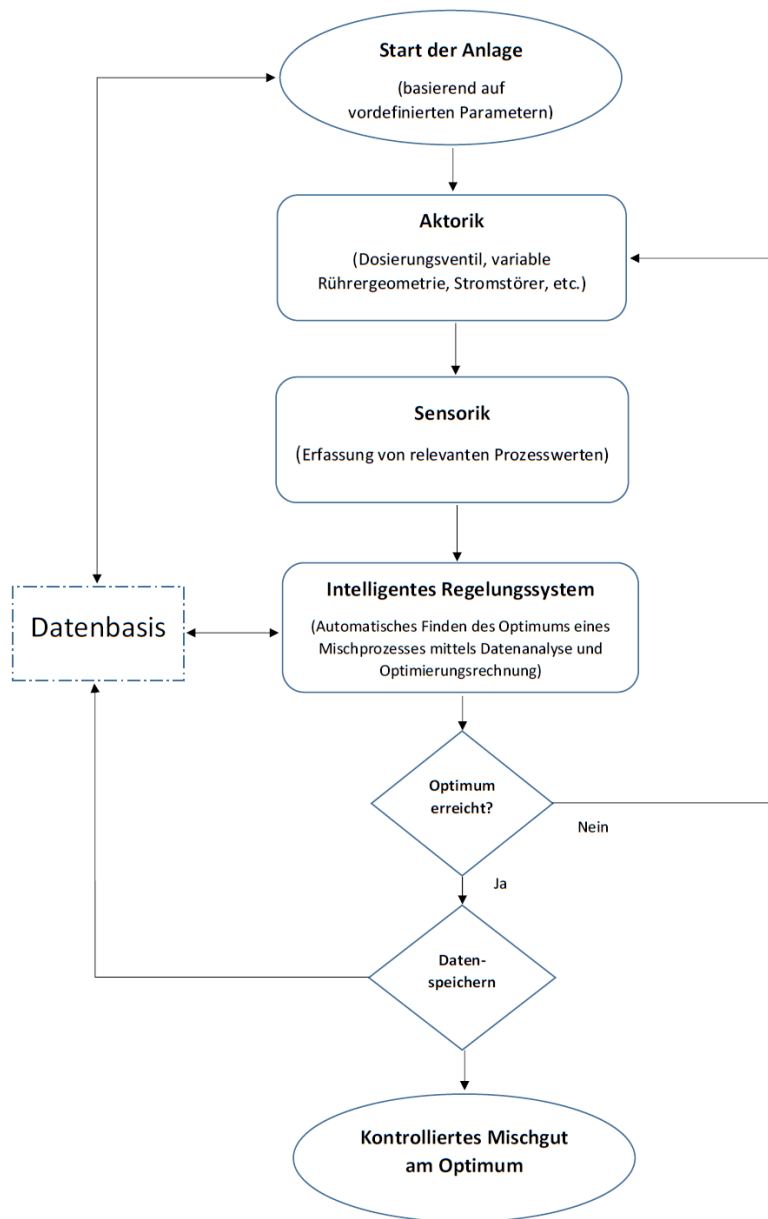


Abbildung 4.17: Vorgehen bei dem angestrebten Regelungssystem für das Suspensionsmischverfahren

AP 8.5 (Bikotronic GmbH): Die Automation der Steuerung und Regelung des Condition Monitoring Systems für den Schräglagenmischer basiert auf einem Bussystem, welches die Informationsübertragung zwischen Sensoren und Aktoren, Schaltern und einem übergeordneten Leitsystemen durchführt. Dazu ist der Bau eines Schaltschranks notwendig. Neben einem Schaltplan und sämtlicher Elektrik sowie Verkabelung in das Gehäuse des Schaltschranks, ist auf eine passende Platzierung der einzelnen Komponenten wie z. B. der Netzteile, Bus-Terminationsboxen, Schnittstellenteile

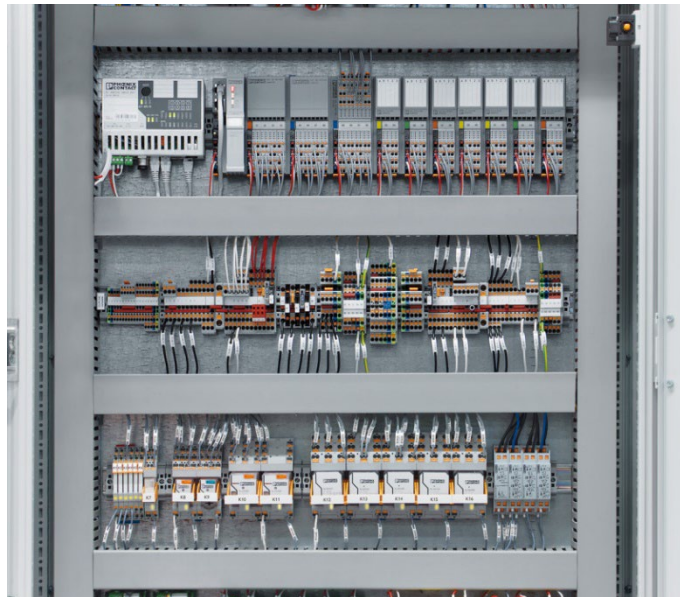


Abbildung 4.18: Schaltschrank: Quelle: www.transforming-cities.de

sowie Zeit- und Überwachungsrelais zu achten, sodass die Entstehung von Hotspots verhindert werden kann. Dabei muss der Schaltschrank individuell für den neuartigen Schräglagenmischer ausgelegt und die Funktionen bzw. Ausstattung des Condition Monitoring Systems mit den einzelnen Sensoren berücksichtigt werden. Des Weiteren wird voraussichtlich eine Klimatisierung für den Schaltschrank integriert.

AP 8.6 (Bikotronic GmbH): Um später bei Bedarf schnell in das Condition Monitoring und Regelungssystem beim Kunden eingreifen zu können, wird die Bikotronic GmbH eine Online-Fernwartung implementieren. Dies erlaubt die Überwachung, Konfiguration und Kalibrierung der Entwicklungen durch die Kniele GmbH, ohne vor Ort sein zu müssen und senkt dadurch die entstehenden Wartungskosten und Wartungsdauer erheblich. Dazu wird ein Industrierouter für eine VPN-Verbindung integriert.

AP 8.7 (Bikotronic GmbH): Mit Hilfe des Condition Monitoring Systems wird die Bikotronic GmbH ein System entwickeln, welches Verschleißerscheinungen am Rührwerk, Antrieb, Mischbehälter oder Sensorik frühzeitig erkennen kann, sodass unvorhersehbare Ausfälle minimiert werden können. Auf Basis der experimentellen Validierung des Schräglagenmischers sollen für die relevanten Prozessparameter wie z. B. Motorleistung bzw. Drehzahl spezifische Grenzwerte ermittelt und den jeweiligen Verschleißarten zugeordnet werden. Wird beispielsweise in einer Phase des Suspensionsmischerverfahrens bei aufeinanderfolgenden Chargen gleicher Rezeptur ein Anstieg des benötigten Motorstroms erfasst, kann dies auf eine zunehmende Abnutzung des Rührwerks oder des Antriebs selbst hinweisen. Die Bikotronic GmbH wird charakteristische Signalmuster mit den Verschleißursachen verknüpft, sodass die restliche Lebensdauer der betroffenen Komponenten extrapoliert werden kann. Zudem ist der Einsatz von Lasersensoren denkbar, welche das Rührwerk und die Rührblätter in regelmäßigen Zeitabständen auf ihre Oberflächenbeschaffenheit und auf Maßabweichungen im Umfang hin überprüfen. Dadurch soll ein fortgeschrittener Materialabrieb erkannt, besonders gefährdete Stellen erkannt und die Bauteile frühzeitig ausgetauscht werden können. Dieser abrasive Verschleiß ist stark abhängig von den zu mischenden Betonrezepturen. Eine Mischung mit vielen groben Bestandteilen wird z. B. einen höheren Verschleiß verursachen, als Beton mit ausschließlich feinen Bestandteilen.

AP 9: Optimierung und Erhöhung der numerischen Effizienz des Simulationsmodells

AP 9.1 (Novicos GmbH): Bis zu diesem Zeitpunkt wurden die CFD-Simulationsmodelle auf ein genau definiertes, repräsentatives Raumvolumen bezogen, welches sich jedoch von den realen Geometrien des Schräglagenmischers unterscheidet. Deshalb wird die Novicos GmbH ein Upscaling durchführen und die Simulationsmodelle erweitern, sodass Aussagen über das Suspensionsmischverfahren im realen Schräglagenmischer getroffen werden können. Dabei wird das zu betrachtende Mischvolumen sowie die Form des Mischraums an die realen Geometrien, z. B. konisch, angepasst (Abbildung 4.19). Dadurch werden sich die Fluidodynamik sowie entstehenden Turbulenzen und infolge dessen die Bildung von Partikelagglomeraten verändern.

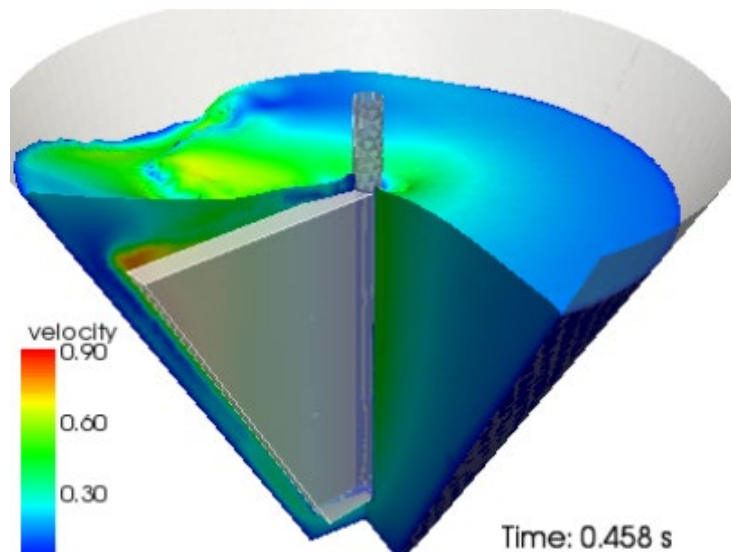


Abbildung 4.19: CFD-Simulation eines konischen Mixers. Quelle: www.nogrid.de

AP 9.2 (Novicos GmbH): Um den Ressourcenaufwand bei den Berechnungen durch die Simulationsmodelle trotzdem in vertretbaren Bereichen zu halten und die Durchführung folgender Arbeitspakete nicht zu verzögern, wird die Novicos GmbH die numerische Effizienz der Modelle erhöhen. Ein Ansatz, der dabei verfolgt werden soll, ist das Coarse Grain Particle Modell. Dabei werden mehrere reale Partikel durch ein einziges, größeres Partikel repräsentiert (Abbildung 4.8). Zudem wird eine Begrenzung der simulierten Zeit angestrebt, d. h. es wird nicht die gesamte Dauer des Mischprozesses exakt abgebildet, sondern nur für die Durchmischung besonders relevante Phasen, beispielsweise bei der Zugabe einer Komponente. Des Weiteren soll der reale Mischer nicht als Ganzes betrachtet werden, diese würde die Rechendauer extrem erhöhen, sondern nur einzelne geometrische Ausschnitte des Schräglagenmischers, sodass die beanspruchte Rechenkapazität und damit die Simulationsdauer minimiert werden kann.

AP 9.3 (Novicos GmbH): Die Maßnahmen zur Reduzierung des Rechenaufwandes der Simulationen basieren letztendlich auf einer Vereinfachung der Modelle, was zwangsläufig mit einem Genauigkeitsverlust der Ergebnisse einhergeht. Beispielsweise kann durch das beschriebene Coarse Grain Particle Model der Einfluss der Partikel auf die Strömung abgebildet werden, die Berechnung der interpartikulären Interaktionen wird jedoch negativ beeinflusst. Um dies zu kompensieren, wird die Novicos GmbH eine Neu-Gewichtung der relevanten Parameter auf Basis der bisherigen Erkenntnisse vornehmen. Beispielsweise kann sich im Zuge des Projektes herausstellen, dass die Temperatur weniger Einfluss auf die Partikelagglomeration besitzt, als bis zu diesem Zeitpunkt angenommen, sodass die Ergebnisse verfälscht werden und die Gewichtung entsprechend der tatsächlichen Relevanz korrigiert werden muss.

AP 9.4 (Novicos GmbH): In diesem Arbeitsschritt wird die Novicos GmbH die entwickelten und für die Anwendung auf den neuartigen Schräglagenmischer erweiterten Simulationsmodelle iterativ optimieren, indem anhand von Testschleifen die simulativ bestimmten Daten mit den experimentell bestimmten Ergebnissen des IWB hinsichtlich Durchmischung und Partikelagglomeration verglichen

werden. In diesem Zusammenhang wird das Unternehmen die Abweichungen erfassen und die Simulationsmodelle entsprechend korrigieren, bis die angestrebte Abbildungsgenauigkeit von ca. 95 % erreicht werden kann.

AP 9.5 (Novicos GmbH): Zudem wird die Novicos GmbH ein Auslegungstool entwickeln, welches auf Basis der Simulationsergebnisse eine automatische Parametrisierung der Mischwerkzeuge bzw. deren Geometrien vornehmen kann. Dies soll die schnelle und flexible Anpassung an verschiedene Applikationen und Betonrezepturen ermöglichen, sodass für jede Anwendung das ideale Mischwerkzeug bestimmt werden kann. Dazu werden die mathematischen Zusammenhänge zwischen den wesentlichen Anlagenparametern wie z.B. Mischergeometrie, Mischvolumen und Betonrezeptur analysiert und ein Algorithmus entwickelt, der in Abhängigkeit der Geometrie des Mischwerkzeuges die Scherrate maximiert. Dies erlaubt die schnelle Konfiguration auch für andere Mischersysteme, neben dem angestrebten Schräglagenmischer.

AP 9.6 (Novicos GmbH): Abschließend wird die Novicos GmbH die entwickelten Simulationsmodelle in eine anwendungsgerechte und leicht zu bedienende Software überführen bzw. implementieren. Dies schließt beispielsweise die Erarbeitung einer Benutzeroberfläche mit ein, welche die Anwendung der Software vereinfacht.

AP 10: Abschließende Tests, Optimierungen und Abschlussdokumentation (IWB, Kniele GmbH, Novicos GmbH, Bikotronic GmbH)

Das Arbeitspaket 10 wird von allen Projektpartnern in enger Kooperation durchgeführt.

AP 10.1: In diesem Arbeitsschritt werden abschließende Testreihen des innovativen Suspensionsmischverfahrens und des neuartigen Mischsystems durchgeführt und die Systemstabilität bestätigt.

AP 10.2: Auf Basis der Abschlusstests werden dann endgültige Modifikationen und Optimierungen sämtlicher Systemkomponenten durchgeführt und so ein technisch einwandfreier Betrieb gewährleistet.

AP 10.3: Eine ausführliche Abschlussdokumentation wird erstellt. Diese enthält eine Betriebsanleitung, technische Datenblätter sowie eine ausführliche Risikobeurteilung. Die Einhaltung relevanter Normen und Richtlinien wird verifiziert.

4.1.4 Technische Risiken des FuE - Projekts entlang des Lösungswegs

AP 2 und 6: (IWB) Schwankender Feuchtegehalt der Betonkomponenten

Ein Parameter, welcher die Eigenschaften des Betons entscheidend beeinflusst, ist der Feuchtegehalt bzw. der Wasserzementwert (WZ-Wert) der Mischung. Dieser ist neben der Wasserzugabe auch von der Eigenfeuchtigkeit bzw. dem wirksamen Wasseranteil der einzelnen Betonkomponenten wie Zuschlag, Zement und Zusatzmittel abhängig. Der Feuchtegehalt der Inhaltsstoffe ist jedoch nicht konstant, sondern schwankt je nach Herkunft, Lagerungsbedingungen und Alter um bis zu 10 % und beeinflusst somit die Gesamtfuchte des Betons und damit die Qualität. Dies erschwert die Berechnung der genauen Dosierung der einzelnen Komponenten in noch unbekanntem Maße und kann sich negativ auf die Betonqualität und die rheologischen Eigenschaften während des Mischprozesses auswirken.

AP 2 (IWB) Kombination verschiedener Zusatzmittel problematisch

Hochleistungsbetone bestehen aus einem komplexen Gemisch verschiedenster reaktiver Komponenten wie Fließmittel oder Betonverflüssiger. Dies trifft auch auf die im Projekt zu untersuchenden Referenzrezepturen zu. Im Zuge der Entwicklung des neuartigen Suspensionsmischverfahren ist es denkbar, dass sich die einzelnen reaktiven Komponenten im flüssigen Medium bzw. bei hohen WZ-Werten während der ersten Phase des Mischprozesses anders verhalten, als es im herkömmlichen Verfahren der Fall ist und es im Zuge dessen zu unvorhergesehenen Wechselwirkungen kommt, welche die Betonqualität negativ beeinflussen. Dies erschwert die Entwicklung bzw. Spezifizierung der einzelnen Phasen des Mischprozesses enorm.

AP 6 (IWB) Eingeschränkte Übertragbarkeit der Laborergebnisse

Das grundlegende Suspensionsmischverfahren soll im Zuge des Projektes zunächst in einem Labormischer entwickelt werden. Dabei handelt es sich um eine high-end Maschinen, welche unter stark kontrollierten Bedingungen und in kleinem Maßstab betrieben wird. Das letztendliche Mischverfahren soll jedoch einerseits für den Schräglagenmischer der Kniele GmbH anwendbar sein, aber auch möglichst umfassend auf andere Mischer übertragen werden können. Dafür muss das Suspensionsmischverfahren in einem Scale-Up Prozess auf die Praxis-Mischer ausgelegt werden. Dabei müssen jedoch veränderte Geometrien und schwankende Parametereinflüsse (z.B. Temperatur) berücksichtigt werden. Die erhalten Laborergebnisse sind somit gegebenenfalls nur eingeschränkt in die reale Anwendung übertragbar, sodass die Entwicklung des Suspensionsmischverfahrens und der Scale Up extrem erschwert ist.

AP 2 und 6 (IWB): Temperaturschwankungen der Betonmischung

Während des mehrstufigen Suspensionsmischverfahrens kann es infolge des Energieeintrages durch das Rührwerk und der entstehenden Wärme bei dem Lösungsprozess von Zement und Zusatzmitteln zu signifikanten Temperaturschwankungen kommen. Diese können jedoch die Funktion einzelner Komponenten und damit die rheologischen Eigenschaften der Mischung negativ beeinflussen, sodass ein kontrollierter Mischvorgang nicht möglich ist. Dies ist zudem für jede Betonrezeptur in

Abhängigkeit der genauen Inhaltsstoffe, Mengenverhältnisse und Feuchtigkeit verschieden und muss deshalb bei der Entwicklung des neuartigen Mischverfahrens individuell berücksichtigt werden. Eine präzise Vorhersage der Temperaturschwankungen ist dennoch kaum möglich und erschwert somit die Entwicklung des Suspensionsmischverfahrens und des Simulationsmodells erheblich.

AP 3 (Novicos GmbH) Vergleichbarkeit der Anfangs- und Randbedingungen zwischen den Simulationsmodellen nicht gegeben

Die Strömungsdynamik und Partikelagglomeration während des Suspensionsmischverfahrens sollen im Rahmen des Projektes mit Hilfe von insgesamt 3 Simulationsmodellen untersucht werden. Dafür müssen jeweils die Anfangs- sowie Randbedingungen festgelegt und die relevanten Einflussgrößen wie z.B. Partikelgröße, Temperatur und Turbulenzen definiert werden. Die Bestimmung dieser Modelparameter und der korrekten Anfangsbedingungen kann jedoch aufgrund Ihrer Komplexität und Wechselwirkungen problematisch sein. Beispielsweise ist die Viskosität selbst wiederum von mehreren Parametern wie Temperatur oder Partikelgröße abhängig. Zudem ist es denkbar, dass sich die Randbedingungen zwischen den einzelnen Modellen so weit unterscheiden, dass eine Vergleichbarkeit nicht möglich ist. Dies erschwert die umfassende Charakterisierung der Betonmischungen und der strömungsmechanischen Vorgänge enorm.

AP 3 (Novicos GmbH) MPPIC-Modell nicht uneingeschränkt nutzbar

In Modell 2 sollen die Partikel-Partikel und Partikel-Fluid Interaktionen mit Hilfe eines Multiphase particle-in-cell Ansatzes (MPPIC) untersucht werden. Dadurch wird das Modell 2 genauer als Modell 1, aber deutlich aufwendiger. Dabei ist es denkbar, dass der gewählte Ansatz nicht uneingeschränkt anwendbar ist und die Zielgrößen nicht genau beschrieben werden können. In diesem Fall muss das Unternehmen zusätzlich ein Star-CCM Multiphase Segregated Flow Modell mit Partikeln als zweiter Phase einsetzen.

AP 9 (Novicos GmbH) Genauigkeitsverlust durch Kompression der Simulationsmodelle

Die Berechnung der Strömungsdynamik und der Partikelagglomeration wird als extrem aufwendig eingeschätzt und benötigt hohe Rechenleistungen. Um die Rechendauer und –Leistung in einem für das Projekt vertretbarem Rahmen zu halten, ist deshalb eine numerische Kompression der Simulationsmodelle notwendig, bei der z. B. die simulierte Zeit begrenzt oder nur ein bestimmter Ausschnitt des Mischbehälters untersucht wird. Dies schränkt jedoch wiederum die Genauigkeit der Berechnungen ein. Der Einsatz des Coarse Grain Models führt z. B. dazu, dass die interpartikulären Wechselwirkungen nicht mehr genau abgebildet werden können. Eine große technische Herausforderung für die Novicos GmbH besteht also darin, die benötigten Ressourcen in Form von Rechendauer und –leistung soweit einzuschränken, dass die Durchführung des Projektes nicht verzögert wird, aber gleichzeitig alle relevanten Effekte für die Partikelagglomeration berücksichtigt und aussagekräftige Ergebnisse generiert werden können.

AP 5 (Bikotronic GmbH): Limitierter Sättigungsgrad der Feuchtigkeitssensoren

Zur Bestimmung des Feuchtegehalts der Betonmischung kommen voraussichtlich Mikrowellensonden zum Einsatz. Deren Sättigungsgrad bzw. Genauigkeit ist jedoch bei hohen Feuchtigkeitsgehalten limitiert. Da im Zuge des Suspensionsmischverfahrens zuerst die flüssigen Komponenten zugegeben werden sollen und der WZ-Wert dabei entsprechend hoch ist, beeinträchtigt dies die Feuchtigkeitsmessungen durch die Sonden enorm, sodass in der Anfangsphase des Mischverfahrens der Wassergehalt nicht bestimmt werden kann. Je nach Betonrezeptur können auch nachfolgende Phasen betroffen sein, solange bis der zulässige Feuchtigkeitsgrenzwert nicht mehr überschritten wird. Dies beeinträchtigt jedoch die umfassende Kontrolle über den Mischprozess.

AP 5 (Bikotronic GmbH): Zu Geringer Widerstand in der Anfangsphase des Suspensionsmischverfahrens

Für eine umfassende Echtzeit Charakterisierung der Betonmischung während des Mischverfahrens soll die Konsistenz der Mischung über den Widerstand des Rührwerks bzw. über die Motorleistung bestimmt werden können. Dabei ist es jedoch denkbar, dass in der Anfangsphase des Mischverfahrens, wenn hauptsächlich die flüssigen Komponenten zugegeben werden, der Widerstand noch zu gering ist, um aussagekräftige Informationen über die Konsistenz erhalten zu können. Das erhaltene Signal kann dann nicht genutzt werden. Dies ist erst ab bestimmtem Schwellenwert möglich, der im Rahmen des Projektes ermittelt werden muss. Die Anfangsphase des Mischverfahrens muss jedoch „blind“ gefahren werden. Dies schränkt die Entwicklung einer Prozesskontrolle im Rahmen des Projektes jedoch erheblich ein.

AP 5 und 8 (Bikotronic GmbH): Störeinflüsse auf die Sensorik

Eine wesentliche Problematik, welche die Entwicklung des Condition Monitoring Systems und der Regelung des Mischprozesses erheblich erschwert, ist der Einfluss verschiedener Störeinflüsse auf die Sensorik. Beispielsweise wird die Genauigkeit der Mikrowellensonde durch die Anwesenheit von Eisenpartikeln stark beeinträchtigt. Schon kleine Mengen in der Mischung führen dazu, dass die Messdaten nicht verwertet werden können. Die Zustandsüberwachung von eisenhaltigen Betonmischungen ist in diesem Fall nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich. Des Weiteren können bei ungenügender Reinigung Betonrückstände vorheriger Mischungen auf den Sensoren zurückbleiben und das Messergebnis beeinflussen. Dies erschwert die Referenzierung der Sensordaten enorm.

AP 4 (Kniele GmbH): Ablagerung grober Gesteinskörnung durch Schräglage des Mixers

Ein Vorteil des neuartigen Mixersystems besteht darin, dass durch die angestrebte Schräglage die Schwerkraft für einen zusätzlichen Stofftransport der Betonkomponenten ausgenutzt und dadurch die Mischdauer verringert werden kann. Dabei ist es jedoch denkbar, dass es ab einer bestimmten Korngröße bzw. Partikelgewicht in Abhängigkeit des Winkels zu einer vermehrten Ablagerung des Zuschlags an der unteren Wandung des Mixers kommt. Diese Ablagerungen wären nur schwer detektierbar bzw. abzuschätzen, zum anderen könnten die Sensordaten bezüglich Konsistenz und Feuchtigkeit durch den entstehenden Gradienten verfälscht werden.

AP 7 (Kniele GmbH): Verschleiß der Mischwerkzeuge und Abstreifer

Die Durchmischung der einzelnen Komponenten des Betons wird durch den Einsatz von Mischwerkzeugen und Abstreifern erreicht. Diese sind dabei extremen mechanischen Belastungen ausgesetzt. Je nach Zusammensetzung und Prozessführung kann es deshalb zu erhöhtem Verschleiß des Materials kommen, sodass die Werkzeuge vorzeitig ausgetauscht werden müssen. Während der Entwicklungen kann sich herausstellen, dass das ausgewählte Material für Abstreifer und Mischwerkzeuge nicht für den dauerhaften Einsatz geeignet ist und z. B. der Kunststoff nicht robust genug ist.

AP 4 (Kniele GmbH): Verschlussstechnik

Während der Auslegung des neuartigen Schräglagenmischers besteht eine besondere Herausforderung in der Konstruktion der Verschluss- und Dichtungstechnik sowie im Rührwerk selbst. Dabei soll eine Zentralschmieranlage zum Einsatz kommen, deren untere Lagerung voraussichtlich im Material liegt. Diese muss absolut dicht gestaltet werden, um Leckagen zu verhindern und den Mischprozess kontrollieren zu können. Bereits geringe Abweichungen können zu einem Dichtigkeitsverlust führen und die Konstruktion des Mixers behindern. Ebenso müssen sämtliche Zugänge für die Dosierung von Material bzw. die Behälteröffnung vollkommen abgedichtet werden. Andernfalls kann Luftfeuchtigkeit aus der Umgebung in den Mischraum eindringen, den Feuchtegehalt des Betons beeinflussen und die sich negativ auf die Qualität auswirken.

AP 4 (Kniele GmbH): Antriebstechnik

Als Antrieb für das Rührwerk des neuartigen Schräglagenmischers soll idealerweise ein Torquemotor zum Einsatz kommen. Ein Nachteil des Torquemotors besteht jedoch in der relativ großen Hitzentwicklung bei hohen Leistungen und langer Antriebsdauer. Schlimmstenfalls kann es deshalb während der experimentellen Validierung zu einer Überhitzung des Motors und entsprechenden Schäden kommen. Je nach Belastungsintensität ist deshalb der Einsatz eines Kühlsystems notwendig. Dies ist jedoch mit zusätzlichem Aufwand verbunden.

4.1.6 Aktuelle Konkurrenzprodukte/-verfahren zum internationaler Stand der Technik im Vergleich mit den geplanten Entwicklungszielen

Mischverfahren:

Wie in 4.1.1 beschrieben, existieren bereits Ansätze für ein Suspensionsmischverfahren zur Herstellung von Beton. Dabei werden der Mörtel bzw. Zementleim und die groben Komponenten wie Zuschlag getrennt angemischt und dann zusammengeführt. Es sind hierfür also zwei Mischersysteme notwendig die parallel betrieben werden müssen. Das angestrebte Suspensionsmischverfahren wird dagegen die Herstellung von Beton in nur einem einzigen Mischersystem ermöglichen und den apparativen Aufwand praktisch halbieren. Gleichzeitig sollen durch den effizienteren Mischablauf ca. 10 % an Materialkosten und Energie eingespart werden können.

Betonmischanlagen

Jeder Mischvorgang ist eine Überlagerung von distributiven und dispersiven Transportvorgängen. Diese werden von der Mischungszusammensetzung von (Ultra-) Hochleistungsbetonen wesentlich beeinflusst. Die geringere Wassermenge und die erhöhte Packungsdichte durch die Verwendung von Mikrofüllern verschlechtern die Grobvermischung [16]. Die Effizienz der Grobvermischung ist zudem von der Partikelgröße abhängig. 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.

Bisher eingesetzte Systeme sind zwar für die Mischung von Normalbeton geeignet, jedoch kaum für die beschriebenen Anforderung der Hochleistungsbetone ausgelegt, was zu übermäßiger Partikelagglomeration und damit Materialbedarf sowie relativ hohen Mischdauern führt. Es existieren verschiedene Typen von Mischersystemen, welche sich im Wesentlichen durch die Anzahl an Rührachsen sowie deren Lage und Ausrichtung unterscheiden. Dabei handelt es sich in der Regel um zylindrische oder konische Mischbehälter, die stehend oder liegend ausgeführt sind:

- Einwellenmischer
- Doppelwellenmischer
- Planetenmischer
- Tellermischer bzw. Ringtellermischer

Im Folgenden werden aktuelle Konkurrenzprodukte dargestellt und mit der angestrebten Entwicklung verglichen.

Doppelwellenmischer der Hedke GmbH

Die Hedke GmbH bietet neben Planeten- und Einwellenmischern auch Doppelwellenmischer mit einer Beschickungskapazität von bis zu 9000 Liter an (Abbildung 4.20). Die Durchmischung beruht auf den beiden Rührwerken, die gleich-oder gegenläufig ausgelegt werden können. In Abbildung 4.21 sind die technischen Daten des Doppelwellenmischers der Hedke GmbH dargestellt.

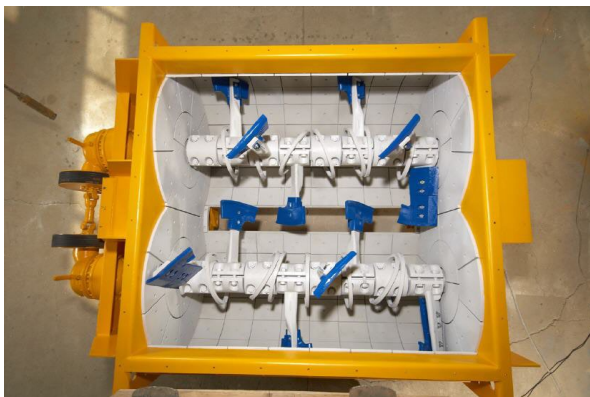


Abbildung 4.20: Doppelwellenmischer der Hedke GmbH. Quelle: www.meka-beton.de

Spezifikation	MB-T 6,0m³;
Beschickungskapazität	9.000 Liter
Frischbeton Kapazität	7.500 Liter
Betonausstoß (verdichtet)	6.000 Liter
Motorleistung	2 x 110 kW
Getriebe	BONFIGLIOLI
Seitenwand Verschleißplatte	20mm ST52
Gehäuse Verschleißplatten	20mm Ni Hard
Mischerarm Verschleißplatten	30mm Ni Hard
Automatisches Schmiersystem	erhältlich
Wasserverteiler	erhältlich
Hydraulische Entladeöffnung	erhältlich
Wartungsklappe Sicherheitsschalter	erhältlich
NOT AUS mit Schlüssel	erhältlich

Abbildung 4.21. Technische Daten des Doppelwellenmischers der Hedke GmbH. Quelle: www.meka-beton.de

Der Doppelwellenmischer ist einem Einwellenmischer hinsichtlich Mischgeschwindigkeit und Durchmischung zwar überlegen, aber auch mit erheblich höherem apparativem Aufwand verbunden, da neben einem größeren Mischbehälter auch ein zweiter Antrieb notwendig ist. Der neue Schräglagenmischer wird dagegen nur einen einzigen Antrieb für das Rührwerk benötigen und das Durchmischungsergebnis des Doppelwellenmischers übertreffen.

Ringtellermischer R 0.5 der Liebherr GmbH

Der Ringtellermischer R 0.5 (Abbildung 4.22) eignet sich für Standardbetone und kleinste Chargengrößen. Durch die spezielle Bauform ist dieser Mischer sehr kompakt



Typ	0.5
Nenninhalt nach DIN 459, Teil 1	0,50 m³
Füllmenge	750 l
Leistung Antriebsmotor	22 kW
Spannung *	Abbildung 4.22: Ringtellermischer R 0.5 von der Liebherr GmbH: www.liebherr.com
Frequenz	
Max. Verschlüsse je Mischer	3
Drehzahlbereich Mischwerk	26 min ⁻¹
Gewicht	2.900 kg

Abbildung 4.23: Technische Daten des Ringtellermischer R 0.5. Quelle: www.liebherr.com

und erzielt gute Mischergebnisse. Zwei leistungsstarke Elektromotoren treiben Hauptrührwerk und Wirblersystem unabhängig voneinander mechanisch an. Durch den Einsatz von Frequenzumrichtern können die Drehzahlen während des Mischvorganges stufenlos verändert werden. Unterschiedliche Drehzahlen beim Befüllen, beim Mischen oder beim Entleeren sind rezeptabhängig möglich. Im Folgenden sind die technischen Daten des Ringtellermischer R 0.5 dargestellt.

Planetenmischer der Pemat Mischtechnik GmbH

Der PMP Planetenmischer (Abbildung 4.24) ist ein robuster Mischer, der sich durch seine Zuverlässigkeit und Langlebigkeit etabliert hat. Der PMP ist durch seitliche Türen am Mischtrog sehr einfach zu reinigen und zu warten. Die gesamten Mischarmaufhängungen und Verstellelemente befinden sich im Inneren des Getriebegehäuses und sind somit schmutzgeschützt untergebracht. Misch- und Abstreifarmer sind elastisch gelagert und können horizontal sowie vertikal eingestellt werden. Die Mischarme sind aus Federstahl und können mit Schleiß-Manschetten versehen werden. Der PMP ist zudem in verschiedenen Ausführungen z.B. mit zusätzlichen Wirblern (PMPR) oder zusätzlichen, unabhängig regelbaren Wirblern (PMPM) erhältlich.

Dadurch erhöht sich jedoch der apparative Aufwand durch den Einsatz zusätzlicher Antriebe sowie der Energiebedarf enorm. Anders als das geplante Mischersystem, ist der PMP horizontal ausgerichtet. Durch die fehlende Schräglage wird die Schwerkraft nicht für den Materialtransport genutzt. Die Durchmischung ist dadurch deutlich schlechter und die Mischdauer erhöht. Darüber hinaus besitzt der PMP kein umfassendes Condition Monitoring System und Regelung für den gezielten Energieeintrag.

Produktgröße		500	750	1125	1500	1875	2250	3000	3375	3750	4500	5250	6000
Füllung max./l		500	750	1.125	1.500	1.875	2.250	3.000	3.375	3.750	4.500	5.250	6.000
Füllung max./kg		800	1.200	1.800	2.400	3.000	3.600	4.800	5.400	6.000	7.200	8.400	9.600
Festbetonausstoß ca. l/Charge		330	500	750	1.000	1.250	1.500	2.000	2.250	2.500	3.000	3.500	4.000
Verarbeitbare Korngröße mm	PMP	0-65	0-65	0-65	0-65	0-65	0-65	0-65	0-65	0-65	0-65	0-65	0-65
	PMPR	0-40											
	PMPM	0-40	0-65	0-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mischtrog-Durchmesser mm		1.720	1.900	2.100	2.500	2.800	2.800	3.264	3.264	3.780	3.780	4.180	4.180
Mischtrog-Höhe mm		700	700	620	750	750	750	800	800	800	800	875	875
Antriebsleistung kW	PMP	15	22	37	45	55	75	90	90	110	132	132	160
	PMPR	22	30										
	PMPM	18,5	22	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Antriebsleistung Wirbler kW	PMPM	18,5	22	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mischsterne/Schaukeln		1/2	1/2	1/2	2/4	2/4	2/4	2/6	2/6	2/6	2/6	2/6	2/6
Abstreifer/Entleerschaufeln		1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
Eigengewicht kg	PMP	2.500	3.000	3.700	5.500	7.000	7.500	9.800	10.800	11.000	11.500	14.000	14.500
	PMPR	2.600	3.100	3.800	5.700	7.200	7.700	9.100	11.000	11.500	12.000	14.200	14.700

Abbildung 4.26: Technische Daten der Planetenmischer von Pemat. Quelle: www.pemat.de

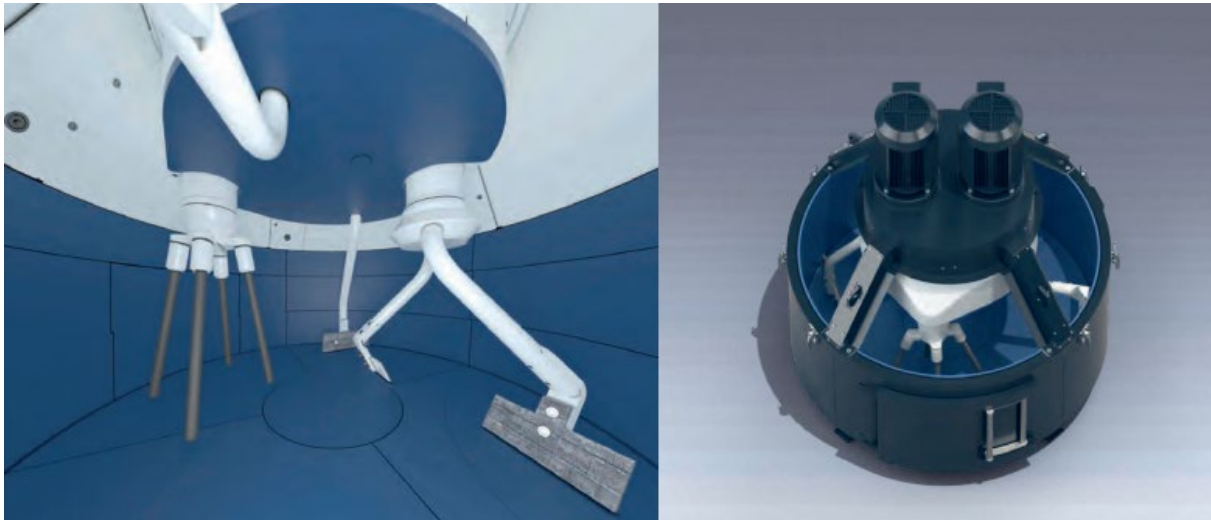


Abbildung 4.25: Planetenmischer von Pemat. Quelle: www.pemat.de

Labormischer KKM-RT 15/22,5 von Kniele GmbH

Ein Produkt der Kniele GmbH, welches den aktuellen Stand der Technik repräsentiert, ist der Labor-Intensivmischer KKM-RT 15/22,5. Dabei handelt es sich um einen Konusmischer mit zwei rotierenden Rührorganen und integriertem Rheometer. Mit einer Füllmenge von maximal 15 L ist das System jedoch nur für die Herstellung von Frischbeton im Labormaßstab gedacht. Der Mischer besitzt einen trichterförmigen Mischraum, in dessen Mittelachse coaxial zwei Rührwerke angebracht sind. Dabei besteht das zentrale Rührwerk aus einer zylindrischen oder konischen Schnecke bzw. schneckenförmig angeordneten Flügeln, während das zweite Rührwerk Mischarme mit Mischschaufeln besitzt, mit denen die vom Mischgut berührte Mischbehälterfläche bestrichen wird. Das zentral laufende Schneckenrührwerk fördert das Mischgut in vertikaler Richtung, wobei das von der Schnecke geförderte Mischgut eine Rotationsbewegung erfährt. Der äußere Rührarm arbeitet dieser Rotationsbewegung entgegen. Durch die Sensorik ist eine Bestimmung der rheologischen Eigenschaften des Mischgutes möglich. Eine Mischersonde zur Feuchtebestimmung und eine Dosiereinheit für die Zugabe flüssiger und trockener Komponenten ermöglichen Parameterstudien zur Mischungsentwicklung.

Die Anwendung des Suspensionsmischverfahrens ist mit dem KKM-RT 15/22,5 zwar möglich, im Gegensatz zur geplanten Entwicklung ist der KKM-RT 15/22,5 jedoch lediglich für die Bearbeitung von Beton in sehr kleinen Mengen geeignet. Der neue Mischer soll hingegen im industriellen Maßstab eingesetzt werden können. Durch die Schräglage kommt es außerdem zu einer besseren und schneller Durchmischung, welche durch die Umschaltung der Drehrichtung des Rührwerks zusätzlich unterstützt wird. Des Weiteren verfügt der KKM-RT 15/22,5 nicht über ein umfassendes Condition Monitoring System.

Zusammenfassend zeigt sich, dass aktuelle Mischersysteme nicht ausreichend für die Anforderungen von Hochleistungsbetonen ausgelegt sind. Die angestrebte Entwicklung wird dagegen in der Lage sein, durch die Schräglage des Mischbehälters, das umschaltbare Rührwerk und die verbesserten

Mischwerkzeuge eine schnellere Durchmischung zu erreichen und gleichzeitig eine Partikelagglomeration zu verhindern. Zudem ist der apparative Aufwand deutlich verringert. In Kombination mit dem neuartigen Suspensionsmischverfahren und dem Condition Monitoring System kann der Ressourcenaufwand in Form von Zement, reaktiven Zusatzmittel und Energiebedarf deutlich reduziert werden.

Im Folgenden werden die relevanten Parameter der Konkurrenzprodukte mit den angestrebten Entwicklungen verglichen.

Parameter	Doppelwellenmischer Hedke GmbH	Ringtellermischer R 0.5 Liebherr GmbH	Planetenmischer Pemat GmbH	KKM-RT 15/22,5 Kniele GmbH	Zielgröße Innovation
Maximale Umfangsgeschwindigkeit bzw. Drehzahl des Rührwerks	-	26 min ⁻¹	12 m/s	1,5 -6 m/s	Ca. 40 min ⁻¹
Max. Füllmenge (Liter)	9000	750	6000	15	500 -1000
Antriebsleistung (kW)	2 x 110	22	90	1,1 und 1,5	20 -30
Reduzierte Mischdauer pro Charge (abhängig von Rezeptur)	-	-	-	-	15 -20 %
Betriebsart	Batch	Batch	Batch	Batch	Batch
Condition Monitoring System	nein	nein	nein	nein	ja
Echtzeitfähige, automatische Regelung der Mischparameter	nein	nein	nein	nein	ja
Reduzierung der Partikelagglomeration	-	-	-	-	Ca. 80 %
Zementeinsparung (abhängig von Rezeptur)	-	-	-	-	10 -15 %
Gezielter Energieeintrag	nein	nein	nein	-	ja
Energieeinsparung	-	-	-	-	Ca. 10 -15 %

4.1.7 Anteil des Antragsstellers am gesamten Vorhaben, Charakterisierung des innovativen Kerns des Teilprojektes und Abgrenzung zu den anderen Teilprojekten

Institut für Werkstoffkunde im Bauwesen (IWB) der Universität Stuttgart

Innovativer Kernpunkt des IWB der Universität Stuttgart ist die Entwicklung eines breit einsetzbaren, mehrstufigen Suspensionsmischverfahrens für verschiedene Rezepturen von Hochleistungs- und Normalbeton, sodass die Partikelagglomeration verhindert und der benötigte Materialeinsatz in Form von Zement und Zusatzmitteln reduziert werden kann.

Ein weiterer innovativer Kernpunkt des IWB liegt in der rheologischen Charakterisierung der Betonmischungen während der einzelnen Phasen des Mischprozesses und in Abhängigkeit der verschiedenen Rezepturen. Dabei werden Grenzwerte ermittelt, welche als Grundlage für die individuelle Regelung des Suspensionsmischverfahrens genutzt werden können. In diesem Zusammenhang wird das IWB auch spezifische Zeit-Energieeintrag-Profile erarbeiten, sodass gezielt Scherkräfte erzeugt und Energie eingespart werden kann.

Kniele GmbH

Innovativer Kernpunkt der Kniele GmbH ist die Entwicklung und konstruktive Auslegung eines neuartigen Schräglagenmischers, dessen Mischbehälter gegenüber der horizontalen geneigt ist und konisch oder zylindrisch ausgeführt werden kann. Der Antrieb bzw. die Mischwerkzeuge sollen in zwei entgegengesetzten Richtungen betreibbar sein und damit eine schnellere und homogenere Durchmischung ermöglichen. Gleichzeitig wird der apparative Aufwand deutlich reduziert, sodass beispielsweise nur ein Antrieb notwendig sein wird.

Novicos GmbH

Innovativer Kernpunkt der Novicos GmbH ist die Entwicklung spezifischer CFD-Simulationsmodelle zur Abbildung der Strömungsdynamik und Partikelagglomeration während des Suspensionsmischverfahrens. Die Herausforderung besteht vor allem in der Berücksichtigung zahlreicher und komplexer Parameter wie u. a. Partikelgröße, Partikelkonzentration, interpartikuläre Wechselwirkungen, Temperatur, Energieeintrag, Viskosität und Mischergeometrien. Zusätzlich müssen die Geometrien des Schräglagenmischers einbezogen werden. Bisher ist kein Simulationsmodell bekannt, welches die Partikelagglomeration für den spezifischen Anwendungsfall und in der ausreichenden Genauigkeit abbilden kann.

Ein weiterer innovativer Kernpunkt der Novicos GmbH besteht in der Optimierung der Mischwerkzeuge hinsichtlich Scherrate, Energieeintrag und erzeugter Turbulenzen auf Basis der CFD-Simulationsmodelle, sodass die Durchmischung zusätzlich verbessert und die Bildung von Agglomeraten verhindert werden kann. In diesem Zusammenhang wird das Unternehmen ein innovatives Tool entwickeln, mit dem die Mischwerkzeuge in Abhängigkeit der jeweiligen Anforderungen schnell und flexibel parametrisiert werden können.

Bikotronic GmbH

Innovativer Kernpunkt der Bikotronic GmbH ist die Entwicklung eines Condition Monitoring Systems für die Zustandsüberwachung rheologische Charakterisierung des Suspensionsmischverfahrens in Echtzeit. Die besondere Herausforderung besteht vor in der Auslegung des Condition Monitoring Systems für die spezifischen Anforderungen des neuartigen Suspensionsmischverfahrens und des innovativen Schräglagenmischers. Eine einfache Übertragung der Überwachungs- und Regelsysteme von herkömmlichen Anlagen und Mischverfahren ist nicht möglich, sodass hier enormer Entwicklungsbedarf besteht.

Auf Basis dessen wird die Bikotronic GmbH eine Steuerungs- und Regelungssoftware sowie der benötigten Hardware erarbeiten, welche die automatische Dosierung und Prozessführung des

Suspensionsmischverfahrens ermöglicht. Diese wird dabei speziell auf die einzelnen Phasen des neuartigen Mischprozesses sowie die verschiedenen Betonrezepturen abgestimmt sein.

4.2.5 Definition von Meilensteinen zur Erreichung der Zielkriterien

Meilenstein	Stichtag	Erreichtes Ziel
1	31.07.2019	Festlegung der technischen Rahmenbedingungen und Anforderungen an das Projekt
2	31.07.2020	Entwicklung eines mehrstufigen Suspensionsmischverfahrens und Beton-Referenzrezepturen sowie rheologische Charakterisierung durchgeführt
3	31.07.2020	Entwicklung von CFD-Simulationsmodellen zur Charakterisierung der Strömungsdynamik und Partikelagglomeration im Suspensionsmischverfahren abgeschlossen
4	31.07.2020	Entwicklung des neuartigen Schräglagenmischers und Herstellung eines Prototypen
5	31.07.2020	Entwicklung eines Condition Monitoring Systems zur Überwachung des Suspensionsmischverfahrens
6	31.07.2021	Scale Up und Optimierung des mehrstufigen Suspensionsmischverfahrens
7	31.07.2021	Optimierung des neuartigen Schräglagenmischers abgeschlossen
8	31.07.2021	Entwicklung einer SPS und eines Wartungssystems für den Suspensionsmischer durchgeführt
9	31.07.2021	Optimierung und Erhöhung der numerischen Effizienz des Simulationsmodells mit einer Abbildungsgenauigkeit von ca. 95 %
10	30.09.2021	Abschließende Tests und Optimierungen durchgeführt