

# Experimentelle Feldstudie zur Untersuchung der Partikelverweilzeit eines Near-Nozzle-Mixing Prozesses in der 3D Beton-Extrusion

Experimental field study to investigate particle residence time in a near-nozzle mixing process in 3D concrete extrusion

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades  
M.Sc.  
an der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München

**Themenstellender** Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner  
Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

**Betreuer/Betreuerin** M.Sc. Maximilian Dahlenburg

**Eingereicht von** Florian Sappl

**Eingereicht am:** 04.04.2024 in Garching

**Inventarnr. fml:** 2023057



# Vorwort

---

Die vorliegende Arbeit entstand unter der wissenschaftlichen und inhaltlichen Anleitung von Maximilian Dahlenburg, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München.

## Vereinbarung zum Urheberrecht

Hiermit gestatte ich dem Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik diese Studienarbeit bzw. Teile davon nach eigenem Ermessen an Dritte weiterzugeben, zu veröffentlichen oder anderweitig zu nutzen. Mein persönliches Urheberrecht ist über diese Regelung hinaus nicht beeinträchtigt.

Eventuelle Geheimhaltungsvereinbarungen über den Inhalt der Arbeit zwischen mir bzw. dem Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik und Dritten bleiben von dieser Vereinbarung unberührt.

Wolfratshausen 02.02.24

\_\_\_\_\_  
Ort, Datum



# Inhaltsverzeichnis

---

|   |            |
|---|------------|
| <b>Inhaltsverzeichnis</b>   | <b>V</b>   |
| <b>Abkürzungsverzeichnis</b>  | <b>IX</b>  |
| <b>Formelzeichenverzeichnis</b>   | <b>XI5</b> |
| <b>1 Einleitung</b>   | <b>1</b>   |
| 1.1 Motivation des Themas   | 1          |
| 1.2 Zielsetzung   | 2          |
| <b>2 Stand der Wissenschaft und Technik</b>                                   | <b>3</b>   |
| 2.1 Grundlagen des Extrusionsbasierten 3D-Betondrucks                         | 3          |
| 2.1.1 Entwicklung und Fortschritte in der Digitalen Fertigung mit Beton (DFC) | 3          |
| 2.1.2 Der Prozess des 3D-Drucks von Beton mittels Extrusionsverfahren         | 6          |
| 2.1.3 Prozessschritte[Wan-2022]   | 8          |
| 2.2 Allgemeine Betrachtungen zur Partikelverweilzeit                          | 10         |
| 2.2.1 Verweilzeit und Verweilzeitverteilung                                   | 10         |
| 2.2.2 Relevanz  | 11         |
| 2.3 Theoretische Modelle zu Bestimmung der Partikelverweilzeit                | 12         |
| 2.3.1 Auswaschfunktion  | 13         |
| 2.3.2 Batch-Reaktor   | 14         |
| 2.3.3 Plug Flow (Piston Flow)   | 14         |
| 2.3.4 Laminarer Durchfluss  | 15         |
| 2.3.5 Kontinuierlich gerührte Tankreaktoren                                   | 16         |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.4 Methoden zu Messung der Partikelverweilzeit               | 17        |
| 2.4.1 Radioaktiver Tracer                                     | 18        |
| 2.4.2 Farbige Tracer  | 18        |
| 2.4.3 Leitfähige Tracer                                       | 19        |
| 2.4.4 Magnetisch empfängliche Tracer                          | 20        |
| <b>3 Materialien und Methoden</b>                             | <b>23</b> |
| 3.1 Beschreibung des betrachteten Extrusionssystems           | 23        |
| 3.2 Auswahl und Charakterisierung der verwendeten Materialien | 27        |
| 3.2.1 Auswahl und Charakterisierung der Tracer-Partikel       | 27        |
| 3.2.2 Zusammensetzung der Mörtelmischung                      | 29        |
| 3.3 Versuchsdesign  | 29        |
| <b>4 Experimentelle Untersuchungen</b>                        | <b>31</b> |
| 4.1 Versuchsplanung   | 31        |
| 4.1.1 Planung für Leitwertmessung                             | 31        |
| 4.1.2 Planung für Fluoreszierende Tracer                      | 34        |
| 4.1.3 Planung für magnetisch empfängliche Tracer              | 36        |
| 4.2 Durchführung der Experimente                              | 37        |
| 4.3 Datenerfassung und -auswertung                            | 43        |
| 4.4 Ergebnisse  | 44        |
| 4.4.1 Parametersatz Nr. 1                                     | 46        |
| 4.4.2 Parametersatz Nr. 2                                     | 48        |
| 4.4.3 Parametersatz Nr. 3                                     | 49        |
| 4.4.4 Parametersatz Nr. 4                                     | 52        |
| 4.4.5 Vergleich aller Parametersätze                          | 54        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>5</b> | <b>Auswertung der Ergebnisse und Diskussion</b> | <b>57</b> |
| <b>6</b> | <b>Zusammenfassung</b>                          | <b>59</b> |
| <b>7</b> | <b>Ausblick</b>                                 | <b>61</b> |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>                     | <b>63</b> |
|          | <b>Abbildungsverzeichnis</b>                    | <b>71</b> |
|          | <b>Tabellenverzeichnis</b>                      | <b>74</b> |





# Abkürzungsverzeichnis

---

| <b>Abkürzung</b> | <b>Bedeutung</b>                     |
|------------------|--------------------------------------|
| 3DCP             | 3D-Betondruck                        |
| DFC              | Digitale Fertigung mit Beton         |
| CNC              | Computer Numeric Control             |
| 1K               | Ein-Komponenten                      |
| 2K               | Zwei-Komponenten                     |
| RTD              | Verweilzeitverteilung                |
| CSTR             | Kontinuierlich gerührter Tankreaktor |
| GRES             | gradationsbereite Extrusionssystem   |
| SPS              | Speicherprogrammierbare Steuerung    |



# Formelzeichenverzeichnis

---

| Formelzeichen | Einheit      | Bedeutung                        |
|---------------|--------------|----------------------------------|
| $W(t)$        | [-]          | Tracerkonzentration zur Zeit     |
| $t$           | [s]          | Zeit                             |
| $\bar{t}$     | [s]          | Mittlere Verweilzeit             |
| $t$           | [s]          | Zeit                             |
| $y$           | [-]          | Anzahl an Effekten               |
| $y_s$         | [-]          | Anzahl an Effekten auf Stufe $s$ |
| $m$           | [kg]         | Masse                            |
| $s$           | [-]          | Anzahl der Stufen                |
| $\delta_\mu$  | [-]          | Ausbeuteunterschied              |
| $U$           | [V]          | Stromspannung                    |
| $I$           | [A]          | Stromstärke                      |
| $R$           | [ $\Omega$ ] | Widerstand                       |
| $G$           | [S]          | Leitwert                         |



# 1 Einleitung

---

Der Klimawandel wird in unserer Zeit zu einer immer drängenderen globalen Herausforderung. Dadurch steigt die Bedeutung nachhaltiger Ansätze in sämtlichen Branchen. Vor allem das Bauwesen zählt zu den Hauptverbrauchern natürlicher Ressourcen und trägt wesentlich zu Treibhausgasemissionen bei. Umso wichtiger sind nachhaltige Entwicklungen in diesem Bereich. Allein die Zementindustrie ist für rund 8% der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich [Dav-2023]. Ein klares Signal für die Notwendigkeit eines grundlegenden Wandels im Bauwesen.

Zusätzlich führen sinkende Produktivität und ein Mangel an Fachkräften in der Baubranche zu einem Trend hin zur stärkeren Industrialisierung [Bar-2017]. Die Einführung digitaler Technologien prägt diesen Übergang zunehmend. Darunter finden sich innovative Methoden wie die additive Fertigung und Bauprozesse in einem großen Maßstab wie der 3D-Betondruck [Rei-2020].

## 1.1 Motivation des Themas

Ein Beschluss des Rats der EU-Mitgliedsstaaten vom Oktober 2022 sieht vor, dass ab 2030 ausschließlich klimaneutrale Gebäude errichtet werden dürfen [Ste-2022]. Das markiert einen Wendepunkt in der europäischen Baupolitik. Dieser ambitionierte Plan zielt darauf ab, den gesamten Gebäudebestand bis 2050 emissionsfrei zu gestalten [Ste-2022]. Das erfordert innovative, klimaverträgliche und ressourceneffiziente Baupraktiken. In diesem Zusammenhang eröffnet der 3D Druck als additive Fertigung ganz neue Möglichkeiten für das Bauwesen.

Im Fokus dieser Semesterarbeit steht der 3D-Druck mit Beton. Diese Technik hat in den letzten Jahren zunehmend an Relevanz gewonnen, Sie gilt als eine der bahnbrechendsten Neuerungen in der Baubranche. Ursprünglich beschränkt sich der Druck auf die Herstellung kleiner Gegenstände. Mittlerweile erstreckt sich seine Reichweite auch auf großflächige Bauanwendungen unter Verwendung von Beton und anderen Bindemitteln [Tan-2022]. Ende 2020 wurde in Beckum wurde das erste in Deutschland gedruckte 3D-Wohnhaus fertiggestellt Der erfolgreiche Abschluss Hauses demonstriert eindrucksvoll die praktische Umsetzbarkeit und das enorme Potenzial des 3D Betondrucks [Vas-2022]. Die Vorteile dieser Technologie sind breit gefächert: Sie reichen von einer bisher unerreichten Gestaltungsfreiheit [Agu-2017], der Eliminierung der Notwendigkeit von Schalungen während der Fertigung [Lim-2012], verbesserte

Arbeitsbedingungen [Mec-2019], einer effizienteren Materialverwendung [Ngo-2018], bis hin zur signifikanten Reduktion von Bauzeiten [Mec-2018] und Arbeitskräfteaufwand. Damit bietet der 3D Betondruck innovative Lösungen für einige der dringlichsten Herausforderungen, mit denen sich die heutige Bauindustrie auseinandersetzen muss.

### **1.2 Zielsetzung**

In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus auf der detaillierten Erforschung und Analyse der Partikelverweilzeit im Rahmen des Near-Nozzle-Mixing Prozesses, einem entscheidenden Aspekt der 3D Beton-Extrusion. Die Studie zielt darauf ab, ein vertieftes Verständnis der komplexen Dynamiken innerhalb dieses Prozesses zu entwickeln, das für die Optimierung der 3D-Drucktechnologie im Bauwesen von grundlegender Bedeutung ist.

Im Kern der Untersuchung steht die Analyse der Bewegung und des Verhaltens der Partikel im Mischbereich. Dieser Bereich ist für die Qualität und Effizienz des Druckprozesses ausschlaggebend. Durch experimentelle Feldtests soll ermittelt werden, wie verschiedene Faktoren die Verweilzeit der Partikel beeinflussen. Dazu gehören unter anderem Geschwindigkeitsprofile, Adhäsivität und Turbulenzen.

## 2 Stand der Wissenschaft und Technik

---

Der 3D-Betondruck (3DCP) vereint traditionelle Bautechniken mit fortschrittlichen digitalen Fertigungsmethoden. Seine Technologie steht an der Schwelle zu einer revolutionären Veränderung in der Art und Weise, wie Gebäude entworfen, konstruiert und gebaut werden. Mit seiner Fähigkeit, komplexe Strukturen herzustellen, und dem Potenzial für eine nachhaltigere Bauweise, hat der 3D-Betondruck das Interesse von Wissenschaftlern, Ingenieuren und Industrieexperten weltweit geweckt. Trotz Herausforderungen wie Skalierbarkeit, Materialentwicklung und der Notwendigkeit, regulatorische Standards zu erfüllen, bietet der 3D-Betondruck eine vielversprechende Zukunft für die Bauindustrie. Er hat das Potenzial, die traditionellen Bauprozesse nachhaltig zu verändern. In diesem Kapitel wird der grundlegende Aufbau des 3DCP und die Theorie hinter der Partikelverweilzeit betrachtet.

### 2.1 Grundlagen des Extrusionsbasierten 3D-Betondrucks

#### 2.1.1 Entwicklung und Fortschritte in der Digitalen Fertigung mit Beton (DFC)

Die digitale Fabrikation mit Beton hat ihre Ursprünge in der Computer Numeric Control (CNC). CNC etablierte sich in den 1960er Jahren und entwickelte sich mit der Computerrevolution der 1970er und 1980er Jahre weiter. Diese Ära leitete die Entwicklung von computergestützter Designsoftware (CAD) ein, die ein parametrisches Design ermöglichte und das architektonische Design maßgeblich beeinflusste [Sco-2000][Men-2006]. Ein markantes Beispiel hierfür ist der Bau der Zollhoff Towers in Düsseldorf (2000) von Frank Gehry. Das Gebäude wurde in CATIA modelliert und man verwendete CNC-Schneiden und Fräsen zur Erzeugung von Schaumformen, die zum Gießen der Struktur des Gebäudes genutzt wurden [Kol-2005].

In den 1980er Jahren führte die Einführung des ersten schichtbasierten Herstellungsprozesses zu einem Durchbruch in der Produktentwicklung. Dabei wurde ermöglicht physische Modelle direkt aus CAD-Daten zu erstellen, was das Rapid Prototyping etablierte [Lip-2012]. In den letzten 25 Jahren gab es signifikante Entwicklungen bei den Materialien und die Verwendung von Rapid-Prototyping-Maschinen für die Produktion von Endprodukten entwickelte sich zur additiven Fertigung [Gib-2015]. Diese Flexibilität in den herstellbaren Geometrien inspirierte frühe Akteure, ähnliche Prinzipien für die Erstellung großer architektonischer Komponenten zu erforschen [Lim-2012].

Das Konzept der Additiven Fertigung im Baubereich entstand in den mittleren 1990er Jahren. Eine gängige Methode dieser Fertigungsart war das „Shotcreting“ [Kha-2020]. Dabei wird Beton durch einen Schlauch zu einer Sprühdüse transportiert und in Schichten unter Druckluft auf eine Fläche aufgetragen. Beim Trocken-Spritzbetonverfahren wird das Wasser erst an der Düse zum trockenen Beton hinzugefügt. Das bedeutet die Mischung findet erst direkt auf der aufzutragenden Fläche statt. Beim Nass-Spritzbetonverfahren wird die flüssige Betonmischung zur Düse gepumpt und dann pneumatisch aufgetragen. Eine weitere verbreitete Technologie in der Additiven Fertigung ist das Contour Crafting. Diese Technik startete ursprünglich als Extrusionsverfahren für keramische Pasten und wurde später auf zementbasierte Materialien ausgeweitet. Das ermöglichte die Herstellung großflächiger Strukturelemente und kompletter Anlagen wie gedruckte Gebäude [Kho-2001]. Gleichzeitig wurde in den 1990er Jahren die Schichtfertigungstechnologie der Selektiven Aggregation eingeführt. Diese Methode umfasst das Auftragen einer Sandschicht (Silizium), gefolgt von der selektiven Ablagerung von Zement auf dieser Schicht und der Aktivierung des Zementbindemittels mit Dampf.

Gemäß der Untersuchung von Buswell lässt sich die digitale Fertigung mit zementbasierten Stoffen in drei Hauptkategorien einteilen: 3D-Betondruck, entwickelt an der Loughborough University, Contour Crafting, entwickelt an der University of Southern California, und D-Shape [Lim-2012]. Der D-Shape-Prozess nutzt ein Verfahren der Pulverablagerung, bei dem ein Binder selektiv zur Verhärtung eingesetzt wird, ähnlich dem Z-corp 3D-Verfahren. Jede Materialschicht wird in der gewünschten Dicke aufgetragen, woraufhin die Binder durch Düsen, die an einem Portalgestell montiert sind, an den Stellen aufgebracht werden, an denen das Bauteil fest sein soll [Lim-2012]. Beim Contour Crafting wird die zementbasierte Paste schichtweise extrudiert. Diese Technik wurde entwickelt, um die Herausforderungen des schnellen, automatisierten Bauens zu meistern [Kho-2006]. Der Betondruck beruht ebenfalls auf der Extrusion von Zementmörtel, jedoch wurden Fortschritte erzielt, um eine dreidimensionale Bewegungsfreiheit zu bewahren und gleichzeitig eine höhere Auflösung bei der Ablagerung zu erreichen. Diese Entwicklung ermöglicht eine verbesserte Kontrolle über die inneren und äußeren Geometrien der gedruckten Strukturen [Lim-2012]. Die Gemeinsamkeiten und Unterschiede dieser drei Technologien werden in Abbildung 2-1 dargestellt. Sowohl der Betondruck als auch das Contour Crafting Verfahren arbeiten mit der schichtweisen Extrusion von Betonmaterial. Während die Betondrucktechnologie dreidimensional operiert und verschiedene Materialien im Druckprozess einsetzen kann, beschränkt sich das Contour Crafting auf ebene Flächen und verwendet nur ein Material. Die D-Shape-Technologie ist ebenfalls eine schichtweise Ablagerungsmethode, die sich auf die Verwendung eines einzigen Materials beschränkt.



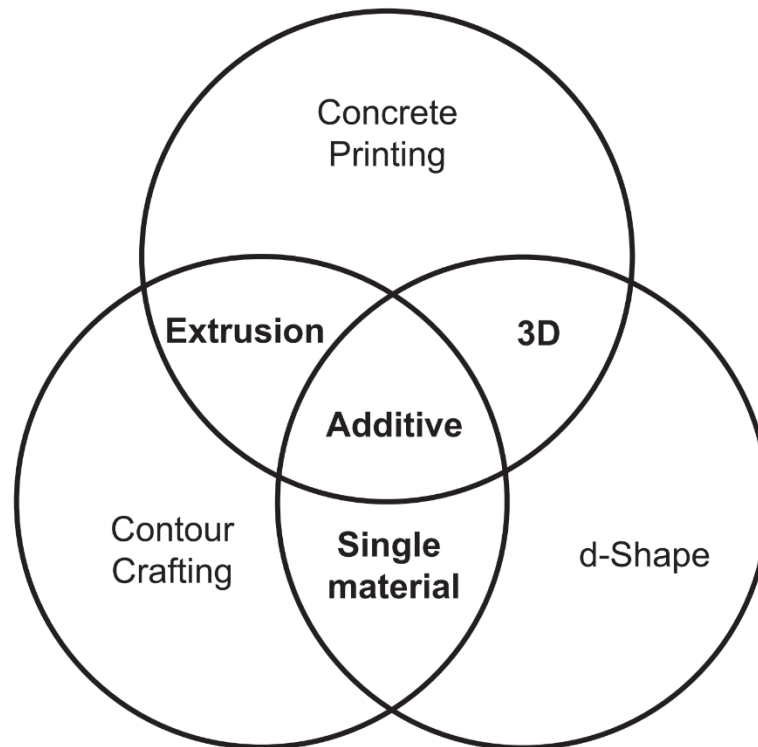


Abbildung 2-1 Gemeinsamkeiten und Unterschiede der drei Prozesse: 3D- Betondruck, Contour Crafting und D-Shape. Abbildung übernommen von [Lim-2012].

In den letzten Jahren hat die Weiterentwicklung von 3DCP und verwandten Technologien zu einer Vielzahl von Anwendungen in der Bauindustrie geführt. Mit Fortschritten in Betonmaterialien und 3D-Drucktechnologie hat die Verwendung von 3DCP den Bau von Gebäuden ermöglicht, die auf spezifische Benutzeranforderungen zugeschnitten sind. Beispiele hierfür sind die Entwicklung einer 3DCP-Prefabrikationsplattform zur Herstellung maßgeschneiderter Säulen [Ant-2021], das CONPrint3D-Konzept der TU Dresden für den monolithischen 3D-Druck vor Ort [Mec-2019] und das Milestone-Projekt in den Niederlanden, das fünf 3D-gedruckte Wohnhäuser umfasst [Bos-2022]. Darüber hinaus hat Dar Al Arkan 2022 mit einem COBOD 3D-Baudrucker, in 6 Tagen, eine dreistöckige Villa errichtet, die eine Rekordhöhe von 9,9 m erreichte und damit zum höchsten vor Ort 3D-gedruckten Gebäude der Welt wurde [Edw-2023].

Die Herausforderungen und Anforderungen im Zusammenhang mit 3D-druckbarem Beton sind im Vergleich zu herkömmlichem Beton deutlich. Der Prozess des Betondrucks beinhaltet entscheidende Schritte wie das Betonmischen, den Transport und die Extrusion. Der extrudierte Beton muss eine schnelle Hydratation durchlaufen, um die gewünschte Schichtfestigkeit zu erreichen, was die Notwendigkeit einer garantierten Pumpbarkeit, Extrudierbarkeit und Bauqualität des Betons unterstreicht [Zha-2021]. Die Bestimmung der Partikelverweilzeit des Betonmischens führt zu einer

effektiveren und leichter zugänglichen Überprüfung der Betonqualität, was eine raschere und unkompliziertere Bewertung ermöglicht.

### **2.1.2 Der Prozess des 3D-Drucks von Beton mittels Extrusionsverfahren**

Im Bereich des 3D-Druck von Beton mittels Extrusionsverfahren umfasst der Prozess zur Erzeugung des finalen Produktes, also eines selbsttragenden 3D-gedruckten Materials, eine Sequenz diversifizierter Schritte. Diese essenziellen Schritte des Fertigungsprozesses sind in der schematischen Darstellung der Abbildung 2-2 visualisiert und dort detailliert beschrieben. Es ist anzumerken, dass spezifische Schritte innerhalb dieser Fertigungskette limitierende Faktoren für nachfolgende Schritte darstellen können. Zudem ist jeder einzelne Schritt entweder als Batch-Verfahren oder als kontinuierlicher Fließprozess realisierbar. Eine entsprechende Differenzierung wird in Abbildung 2-2 besonders gekennzeichnet. Diese Unterscheidung ist von signifikanter Relevanz, da sie direkten Einfluss auf die Effizienz, Skalierbarkeit und Qualität des Endprodukts hat und somit eine zentrale Rolle in der Optimierung des gesamten Fertigungsprozesses spielt.

Buswell et al. [Bus-2020] entwickelten ein Klassifikationsschema für Prozesse, insbesondere in Relation zu den bestehenden Rahmenbedingungen innerhalb der größeren Gemeinschaft der additiven Fertigung. In diesem Schema werden Prozesse der Digitalen Fabrikation mit zementbasierten Materialien primär nach ihrem hauptsächlichsten Formgebungsverfahren kategorisiert. Ergänzt werden sie durch diverse substanzielle Unterprozesse, die für die Fertigung des Endprodukts von essenzieller Bedeutung sind. In Anlehnung an die Terminologie der Beschichtungsindustrie werden diese Prozesse klassifiziert als Ein-Komponenten- (1K) oder Zwei-Komponenten-Systeme (2K). Die Hauptphasen jedes Systems sind in Abbildung 1 dargestellt. 2K-Systeme umfassen sämtliche Verarbeitungsschritte bis hin zur Extrusion, während 1K-Systeme den Schritt der sekundären Mischung aussparen. Großflächige Drucke vor Ort können mehrere hundert Quadratmeter abdecken und sind bislang ausschließlich auf 1K-Systeme beschränkt. Zu diesen zählen die fortschrittlichsten kommerziell verfügbaren Drucksysteme, beispielsweise von COBOD, Apis Cor, Contour Crafting und ICON. 2K-Systeme, wie jene von Sika und Baunit, werden derzeit für deutlich kleinere Flächen eingesetzt, um im Wesentlichen vorgefertigte Komponenten mit sehr schnellen vertikalen Bauweisen zu produzieren [Wan-2022].

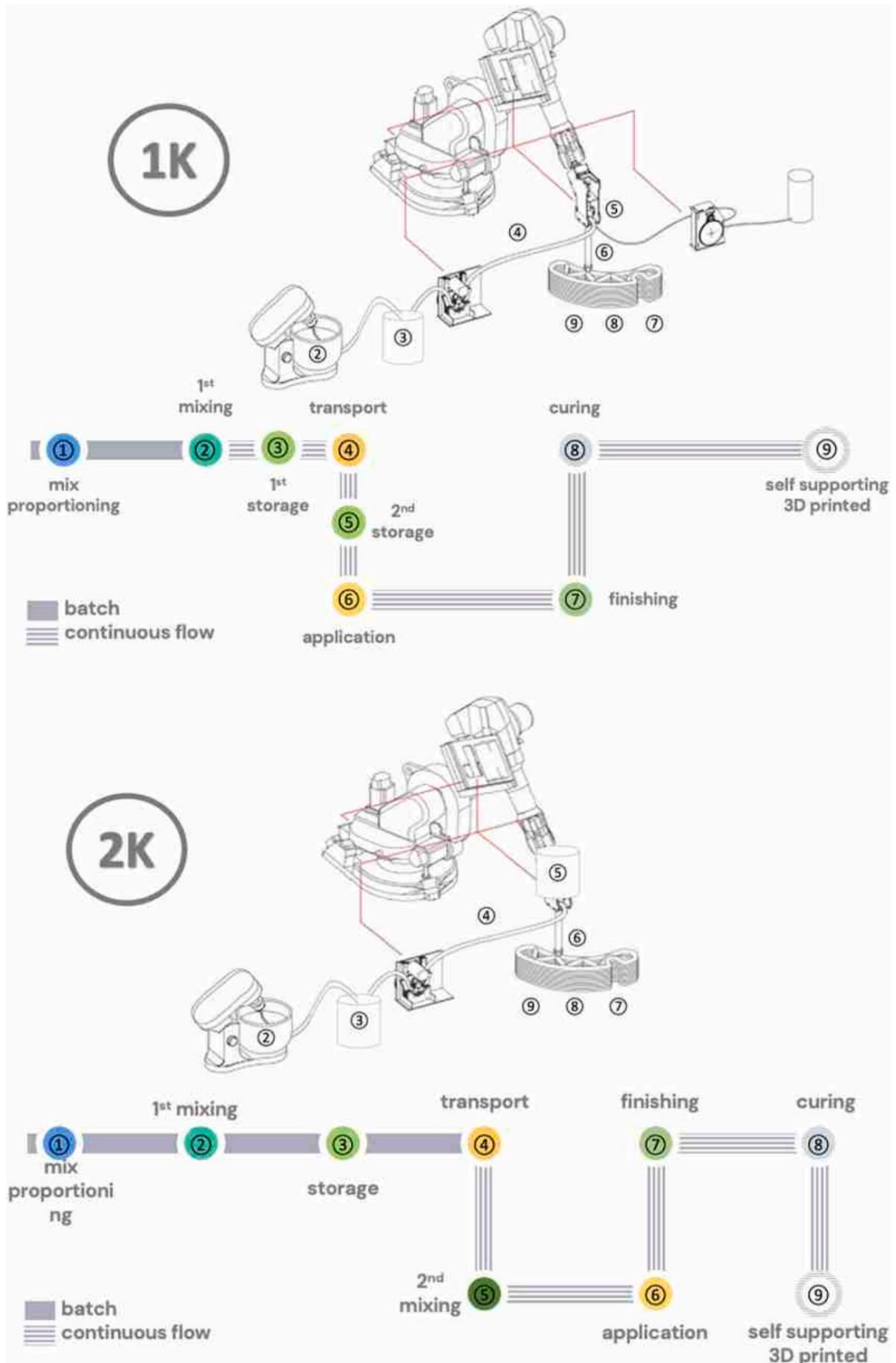


Abbildung 2-2 Visualisierung der diversen Prozessschritte im Rahmen der Extrusionsverfahren beim 3D-Druck mit Beton. 1K Systeme beinhalten, im Gegensatz zu 2K Systemen, keinen Schritt des sekundären Mischens kurz vor der Extrusion. Abbildung übernommen von [Wan-2022].

### 2.1.3 Prozessschritte[Wan-2022]

#### 2.1.3.1 Mischungsdosierung (mix proportioning)

Die Proportionierung der Mischkomponenten (Schritt 1, mix proportioning) bezeichnet den präzisen Vorgang der Quantifizierung und Abwägung definierter Volumina trockener Materialien, Wasser, chemischer Additive und weiterer Komponenten der Mischung. Diese Prozedur erfolgt vornehmlich im Batch-Verfahren. Obgleich gelegentlich ad-hoc-Mischungen vorkommen, dominiert zunehmend das Prinzip der Prädosierung in Trockenmischungschargen, zu denen im Zuge der primären Mischphase Wasser und gegebenenfalls chemische Zusätze integriert werden. Alternativ lässt sich dieser Prozess mittels volumetrischer Mischer auch auf kontinuierlicher Basis implementieren [Wan-2022].

#### 2.1.3.2 Primäres Mischen (1st mixing)

Der primäre Mischprozess (Schritt 2) kennzeichnet die initiale Addition von Wasser zu den trockenen Komponenten, wobei mechanische Energie zur homogenen Dispersion der trockenen Materialien eingesetzt wird. Dies dient der Etablierung eines effektiven Kontakts zwischen dem Wasser und den trockenen Bestandteilen, mit dem Ziel, eine gleichmäßige Benetzung aller Feststoffpartikel zu erreichen und chemische Additive effizient im Gemisch zu dispergieren. Obwohl dieser Prozess im Vergleich zu anderen Aspekten der Betonverarbeitung möglicherweise nicht eingehend untersucht wurde, ist er der einzige Mischschritt, der speziell für zementöse Materialien von Interesse ist, insbesondere im Kontext von Hochleistungsbetonen und deren Einfluss auf die Hydratation. Die Durchführung dieser Mischoperation erfolgt üblicherweise in einem Chargenmischer, doch viele 3D-Drucksysteme realisieren sie kontinuierlich mittels kommerziell verfügbarer Durchlaufmischer. Die normale Mischdauer variiert von wenigen Sekunden bis zu mehreren Minuten [Wan-2022].

#### 2.1.3.3 Lagerung (storage)

In Systemen, die Chargenmischer verwenden, existiert ein spezifischer Schritt, in welchem das Material temporär gelagert wird, bevor es dem Pumpsystem zugeführt wird. Diese Lagerungsoperation (Schritt 3) wird gewöhnlich in Chargen durchgeführt. Dennoch existieren Trichtersysteme, die das Material in Förderschnecken einleiten, welche simultan als Speicher dienen. Diese unitäre Prozessstufe kann gelegentlich auch anderen Abschnitten des Verfahrens vorangehen; exemplarisch hierfür steht das COBOD-Drucksystem, in welchem ein Trichter das Material dem Rotor/Stator des Druckkopfes zuführt, wie in Abbildung 2-2 dargestellt (Schritt 5 für 1K-Systeme) [Wan-2022].

### 2.1.3.4 Transport

Der Transportprozess (Schritt 4) beinhaltet die Beförderung des Materials zum Druckkopf, welcher überwiegend durch Pumpsysteme realisiert wird. Die Mehrzahl der dokumentierten Systeme nutzt hierfür progressive Verdrängerpumpen (Rotor/Stator-Pumpen), obgleich auch andere Arten von Verdrängerpumpen Anwendung finden können. Die Pumpfähigkeit von Beton und anderen zementbasierten Materialien wurde bereits umfassend untersucht, obwohl es spezifische Besonderheiten beim Pumpen von für den 3D-Druck geeigneten Materialien gibt. Hierzu zählt insbesondere, dass die meisten dieser Materialien generell eine hohe Fließgrenze und Thixotropie aufweisen. Werden sie allerdings direkt am Druckkopf aktiviert, weisen sie in der Regel niedrigere Fließgrenzen auf und werden flüssiger [Wan-2022].

### 2.1.3.5 Sekundäres Mischen (2nd mixing)

Der sekundäre Mischungsschritt involviert die Integration eines Additivs am Druckkopf, um die Steifigkeit zu regulieren und die Bauqualität zu erhöhen. Zusätzlich können weitere Additive, wie beispielsweise Farbstoffe, beigemischt werden. Üblicherweise wird dieser Schritt mittels eines aktiven Mischers realisiert, wenngleich in jüngerer Vergangenheit auch der Einsatz statischer Mischer dokumentiert wurde. Dieser Prozess ist nicht ausschließlich für den 3D-Druck relevant, sondern findet ebenso Anwendung in der Nassspritzbetontechnik, bei der die Vermischung des Beschleunigers mit dem aufgespritzten Beton direkt vor dem Ausprühen aus der Düse erfolgt. In Abbildung 2-1/Abbildung 2-2 wird der Unterschied zwischen 1K und 2K Systemen illustriert, wobei dieser Schritt (5, für 2K-Systeme) als wesentliches Differenzierungsmerkmal fungiert [Wan-2022].

### 2.1.3.6 Auftrag (application)

Der Applikationsschritt (Schritt 6) im Rahmen des 3D-Betonextrusionsdrucks umfasst die eigentliche Extrusion aus dem Druckkopf, wobei das Material spezifischen Anforderungen genügen muss, die primär mit der erwarteten Formstabilität des extrudierten Filaments korrelieren. Das Filament muss in der Lage sein, seine Form zu bewahren, ohne jedoch so steif zu sein, dass es Rissbildung verursacht. Es existieren zwei theoretische Grenzzustände für die Filamentform: 1) der "unendliche Ziegelstein", charakterisiert durch eine hohe Fließgrenze und eine begrenzte Scherzone entlang des Filaments, und 2) das stark fließende, vollständig gescherte Filament mit einer niedrigen, aber rasch ansteigenden Fließgrenze. Häufig zeigen Ein-Komponenten-Prozesse Merkmale des "unendlichen Ziegelsteins", während Zwei-Komponenten-Systeme flüssigere Filamente aufweisen, um die Verarbeitung im Druckkopf zu vereinfachen. In anderen digitalen Betonfertigungsverfahren, wie etwa beim Digital Casting, unterscheiden sich die Anforderungen leicht. Wobei zunächst eine niedrigere Fließgrenze

erforderlich ist, um das Material in die Form zu leiten und diese auszufüllen, bevor eine rasche Erhöhung der Fließgrenze stattfindet [Wan-2022].

### **2.1.3.7 Abschluss (finishing)**

Diverse Technologien implementieren einen finalen Verarbeitungsschritt (Schritt 7), in welchem der Beton noch in seinem formbaren Zustand mittels eines Formgebungssystems modifiziert wird. Diese Manipulation kann synchron mit dem Extrusionsprozess erfolgen, wie beispielsweise im Contour Crafting-Verfahren, das robotergesteuerte Glättwerkzeuge einsetzt, oder sie kann mechanisch zu einem späteren Zeitpunkt vollzogen werden [Wan-2022].

### **2.1.3.8 Aushärten (curing)**

Der Härtingsprozess (Schritt 8) kann im Kontext des 3D-Drucks als die Phase definiert werden, in der der Beton ausreichende Festigkeit entwickelt, um zusätzliche Schichten zu stützen. Dieser Schritt ist essenziell, um die sogenannte "Baubarkeit" zu erreichen, da eine unzureichende Festigkeitsentwicklung letztendlich zum Kollaps der gedruckten Struktur führen kann. Ein Material mit adäquater Festigkeitsentwicklung zielt auf das ultimative Ziel des Prozesses ab – die Erstellung eines selbsttragenden, 3D-gedruckten Bauwerks. Jedoch sollte beachtet werden, dass der Aushärtungsschritt auch kritische Prozesse in Bezug auf die Feuchtigkeitsregulierung einschließen kann, die potenziell entscheidend sind, um das Auftreten von "kalten Fugen" zu verhindern [Wan-2022].

## **2.2 Allgemeine Betrachtungen zur Partikelverweilzeit**

### **2.2.1 Verweilzeit und Verweilzeitverteilung**

Die Verweilzeit wird im wissenschaftlichen Kontext als Residence Time bezeichnet. Sie ist ein fundamentaler Parameter in der Verfahrens- und Chemietechnik und definiert die durchschnittliche Zeitspanne, die ein einzelnes Fluidpartikel oder ein Reaktand innerhalb eines spezifischen Systems oder Reaktors verbringt. Diese Zeitdimension ist von zentraler Bedeutung für das Verständnis und die Analyse von Prozessen in Disziplinen wie chemischer Reaktionstechnik, Bioprozesstechnik und Umwelttechnik [Mec-2020] [Raw-2013][Lev-1999].

In der chemischen Verfahrenstechnik und angrenzenden Disziplinen wird die Verweilzeitverteilung, häufig als RTD abgekürzt. Sie ist definiert als Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zeitdauer, die Partikel, sei es in fester oder flüssiger Form, innerhalb eines

oder mehrerer Prozessschritte in einem kontinuierlichen Fließsystem verbringen. Diese Verteilung ist ein kritischer Indikator für die Fließ- und Vermischungsdynamik innerhalb des Systems. Wie Gao et al. und Rawlings und Ekerdt hervorheben, ermöglicht die Analyse der RTD ein vertieftes Verständnis der Vorgänge und Interaktionen zwischen den Materialien im Verlauf ihrer Passage durch das System. Sie ist somit ein Schlüsselinstrument zur Optimierung von Prozessabläufen und zur Gewährleistung der Homogenität und Effizienz in Reaktionsprozessen [Gao-2012][Raw-2013].

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass die Verweilzeit eine aggregierte, durchschnittliche Kennzahl darstellt, die einen allgemeinen Überblick über die Prozessdauer gibt. Die Verweilzeitverteilung hingegen bietet ein umfassenderes und detaillierteres Bild der Zeitdynamik im System, indem sie die Bandbreite und Verteilung der individuellen Verweilzeiten aufzeigt.

### **2.2.2 Relevanz**

Die Auseinandersetzung mit Verweilzeiten und Verweilzeitverteilungen ist von fundamentaler Bedeutung für verfahrenstechnische Prozesse, insbesondere solche, die strömungstechnische Aspekte beinhalten [Raw-2013] [Lev-1999]. Die Pionierarbeit von Danckwerts [Dan-1995] in Bezug auf diese Konzepte markierte einen Wendepunkt in der chemischen Verfahrenstechnik und ist ebenso von zentraler Bedeutung für moderne Ansätze in der digitalen Betonverarbeitung.

In Betonmischsystemen ist die Partikelverweilzeit ein kritischer Faktor, der direkt die Qualität und Funktionalität des resultierenden Betons beeinflusst. Die Verweilzeit bezieht sich hier auf den Zeitraum, den verschiedene Betonkomponenten – darunter Zement, Zuschlagstoffe, Wasser und gegebenenfalls Additive – benötigen, um eine homogene Mischung zu erzielen. Eine adäquate Verweilzeit ist ausschlaggebend für die Homogenität des Betons, da sie eine gleichmäßige Verteilung aller Bestandteile gewährleistet. Damit trägt sie entscheidend zur Konsistenz und strukturellen Integrität des Endprodukts bei [Zey-2020][Wan-2022][Wan-2005].

Des Weiteren spielt die Verweilzeit eine signifikante Rolle im Prozess der Zementhydratation. Eine unzureichende Verweilzeit kann zu einer inkompletten Reaktion des Zements mit Wasser führen. Das kann sowohl negative Auswirkungen auf die Festigkeit als auch auf andere physische Eigenschaften des Betons haben. Darüber hinaus ist die optimale Verweilzeit entscheidend, um die Arbeitsfähigkeit und Verarbeitbarkeit des Betons zu sichern. Eine ausgewogene Verweilzeit ermöglicht, dass der Beton eine angemessene Konsistenz für die Anwendung erreicht. Unangemessene

Verweilzeiten, sei es zu kurz oder zu lang, können Probleme bei den Fließeigenschaften und der Handhabung des Betons verursachen [Mec-2020].

### 2.3 Theoretische Modelle zu Bestimmung der Partikelverweilzeit

In der wissenschaftlichen Analyse der Partikelverweilzeit in strömungsdynamischen Systemen werden drei Hauptströmungsmodelle unterschieden, die in der Literatur ausgiebig erforscht wurden. 1) Plug Flow (Piston Flow), 2) laminarer Durchfluss und 3) kontinuierlich gerührte Tankreaktoren (CSTR).

Die verschiedenen Verteilungsfunktionen stehen miteinander in Beziehung durch die Differenzielle Verteilungsfunktion:

$$f(t) = \frac{-dW}{dt} = \frac{dF}{dt} \quad (2-1)$$

$W$  ist die Verweilzeit Auswaschfunktion und  $F$  die Kumulative Verteilungsfunktion der Verweilzeiten. Die zentralen Momente der Verteilung sind gegeben durch:

$$\mu_n \int_0^{\infty} t^n \cdot f(t) dt = n \int_0^{\infty} t^{n-1} W(t) dt \quad (2-2)$$

$\mu_n$  ist der  $n$ te Moment der Verweilzeitverteilung. Das nullte Moment ist 1. Dies und die Nicht-Negativität sind die einzigen Einschränkungen für  $f(t)$ . Die Einschränkungen für  $W(t)$  sind, dass  $W(0) = 1$ ,  $W(\infty) = 0$  und dass  $W(t)$  nicht zunehmend ist.

Die ersten beiden Momente der RTD können in der Regel mit einer gewissen Genauigkeit bestimmt werden und sind im Allgemeinen nützlich. Das erste Moment ist die mittlere Verweilzeit.

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} W(t) dt \quad (2-3)$$

Wobei  $\bar{t}$  die mittlere Verweilzeit,  $W(t)$  die Tracerkonzentration zur Zeit  $t$  und  $f(t)$  ist die Differenzielle Verteilungsfunktion. Dieses  $\bar{t}$  kann durch Integration unter einer experimentellen Auswaschfunktion gefunden werden. Es kann auch aus Messungen des Systeminventars und des stationären Durchsatzes ermittelt werden,



$$t = \frac{\widehat{\rho} \cdot V}{\rho_{out} \cdot Q_{out}} \quad (2-4)$$

Da dies einfach

$$t = \frac{V}{Q} \quad (2-5)$$

wird, wenn die Dichte konstant ist.  $\rho$  ist hier die Dichte,  $V$  das Volumen und  $Q$  der Volumenstrom. Die Übereinstimmung der  $\bar{t}$ -Werte, die durch diese beiden Methoden berechnet wurden, bietet eine gute Überprüfung der experimentellen Genauigkeit. Gelegentlich wird eine experimentelle Auswaschfunktion verwendet, um ein unbekanntes Volumen oder eine unbekannt Dichte zu bestimmen [Nau-2008].

### 2.3.1 Auswaschfunktion

Die Auswaschfunktion, formal als  $W(t)$  bezeichnet, repräsentiert ein fundamentales Konzept in der Verfahrenstechnik und Chemietechnik, die Dynamik der Eliminierung einer Substanz aus einem System nach Beendigung ihrer Zufuhr. Dieses Konzept ist insbesondere bei der Analyse von Strömungsprozessen und der Dynamik in Reaktorsystemen von essenzieller Bedeutung [Pau-2004].

Konkret lässt sich die Auswaschfunktion anhand eines Szenarios mit einem inerten Tracer in einem kontinuierlich betriebenen System veranschaulichen, wie etwa einem chemischen Reaktor. Während der kontinuierlichen Zufuhr des Tracers etabliert sich eine konstante Konzentration des Tracers sowohl am Eingang als auch am Ausgang des Systems. Die Auswaschfunktion kommt zur Anwendung, sobald die Zufuhr des Tracers abrupt unterbrochen wird. Von diesem Zeitpunkt an beginnt die Konzentration des Tracers am Ausgang des Systems zu sinken, reflektierend den Prozess des "Auswaschens" des Tracers aus dem System.

Mathematisch manifestiert sich die Auswaschfunktion  $W(t)$  als eine Funktion, die den zeitlichen Verlauf der abnehmenden Tracer-Konzentration am Systemausgang darstellt, bis diese gegen Null konvergiert. Das ist indikativ dafür, dass der Tracer vollständig aus dem System entfernt wurde. Die Auswaschfunktion liefert kritische Einblicke in den Stofftransport innerhalb des Systems sowie in die Verweildauer der Substanzen, was für das Verständnis der Prozesseffizienz und der Systemdynamik von Bedeutung ist.

In Abbildung 2-3 Abbildung 2-3 werden die Auswaschfunktionen verschiedener Strömungssysteme präsentiert. Die Zeitskala in dieser Abbildung wurde in eine dimensionslose Zeit  $t/\bar{t}$  umgewandelt. Diese Konversion impliziert, dass die Integralwerte der diversen Auswaschfunktionen einen einheitlichen Mittelwert von eins aufweisen. Dies ermöglicht einen objektiven Vergleich der Strömungssysteme, unabhängig von deren spezifischen Dimensionen oder Größenverhältnissen.

### 2.3.2 Batch-Reaktor

In der Strömungsdynamik existieren diverse Strömungsregime, die unterschiedliche Verhaltensweisen aufweisen. Jedoch ist das Konzept des Batch-Reaktors fundamental und am einfachsten zu verstehen. In einem solchen Batch-Mischsystem ergibt sich die durchschnittliche Verweilzeit aus der zeitlichen Differenz zwischen dem Einbringen und dem Ausstoß der Materialien. Die zugehörige Auswaschfunktion im Batch-Reaktor gleicht einer Stufenfunktion, wie die des Plug Flow (Piston Flow), da alle Materialien exakt zum selben Zeitpunkt aus dem Mischsystem entlassen werden. Dieses Phänomen ist charakteristisch für Batch-Prozesse, bei denen die gesamte Charge gleichzeitig verarbeitet und freigesetzt wird [Wan-2022].

### 2.3.3 Plug Flow (Piston Flow)

Pfropfenströmung bezieht sich auf ein Strömungsmodell, bei dem angenommen wird, dass alle Fluidpartikel mit der gleichen Geschwindigkeit linear und parallel zueinander durch ein Rohr oder einen Reaktor bewegt werden, ohne dass es zu einer Vermischung in axialer Richtung kommt. Dieses Modell wird oft als idealisiert betrachtet, weil es eine vollständige radiale Mischung annimmt. Das bedeutet, dass innerhalb eines Querschnitts des Rohres oder Reaktors die Konzentration der Partikel überall gleich ist, aber keine axiale Mischung oder Rückvermischung zwischen den Fluidpartikeln stattfindet [Wan-2022][Pau-2004].

Die Annahme der Pfropfenströmung ermöglicht, die Verweildynamik und damit die Reaktionskinetik unter idealen Bedingungen zu modellieren, was zu vereinfachten Berechnungen und Analysen führt. Da sich alle Partikel mit derselben Geschwindigkeit bewegen und gleichzeitig in den Reaktor eintreten und diesen verlassen, entspricht die Verweilzeit eines jeden Partikels genau der Betriebszeit des Reaktors. Das erleichtert die Vorhersage der Produktzusammensetzung und die Optimierung des Prozesses [Pau-2004].

Die Auswaschfunktion bei einem solchen Reaktor entspricht daher einer Stufenfunktion: Die Tracerkonzentration bleibt bis zu dem Punkt konstant, an dem der erste Tracer den Reaktor verlässt. Sobald der letzte Tracer den Reaktor verlassen hat, fällt sie

abrupt auf null ab, wie in Abbildung 2-3 zu sehen. Dies geschieht genau nach der durchschnittlichen Verweilzeit des Tracers im Reaktor [Nau-2008].

$$W(t) = 1 \quad (\text{für } t < \bar{t}) \quad (2-6)$$

$$W(t) = 0 \quad (\text{für } t > \bar{t}) \quad (2-7)$$

Und

$$f(t) = \delta(t - \bar{t}) \quad (2-8)$$

### 2.3.4 Laminarer Durchfluss

Laminarer Durchfluss bezeichnet eine Strömungsform, bei der sich die Fluidpartikel entlang paralleler Bahnen bewegen, ohne sich quer zu diesen Bahnen zu vermischen. Diese Strömungsform tritt typischerweise bei niedrigen Geschwindigkeiten und in Röhren mit kleinem Durchmesser auf. Ein charakteristisches Merkmal des laminaren Durchflusses ist die parabolische Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt des Rohres oder Kanals: Partikel in der Nähe der Wand bewegen sich aufgrund der Wandreibung langsamer als jene in der Mitte des Strömungspfades [Wan-2022][Pau-2004].

In einem laminaren Durchfluss gibt es aufgrund der parabolischen Geschwindigkeitsverteilung eine breitere Verteilung der Verweilzeiten der Tracer-Partikel. Partikel in der Mitte des Rohres werden schneller ausgewaschen als jene an der Wand, was zu einer allmählichen Abnahme der Tracer-Konzentration am Ausgang des Systems führt. Die Auswaschfunktion erscheint daher nicht als abrupte Stufenfunktion, sondern als kontinuierlich abfallende Kurve, die die allmähliche Entfernung des Tracers aus dem System über einen längeren Zeitraum widerspiegelt (siehe Abbildung 2-3).

Diese verlängerte Auswaschdynamik in laminaren Strömungssystemen hat direkte Auswirkungen auf die Misch- und Reaktionsprozesse, da die heterogene Geschwindigkeitsverteilung zu einer breiteren Streuung der Reaktionszeiten führt. Dies kann insbesondere in chemischen und biologischen Prozessen von Bedeutung sein, bei denen die Reaktionskinetik eine Rolle spielt. Somit muss sie bei der Prozessgestaltung und -optimierung berücksichtigt werden [Pau-2004].

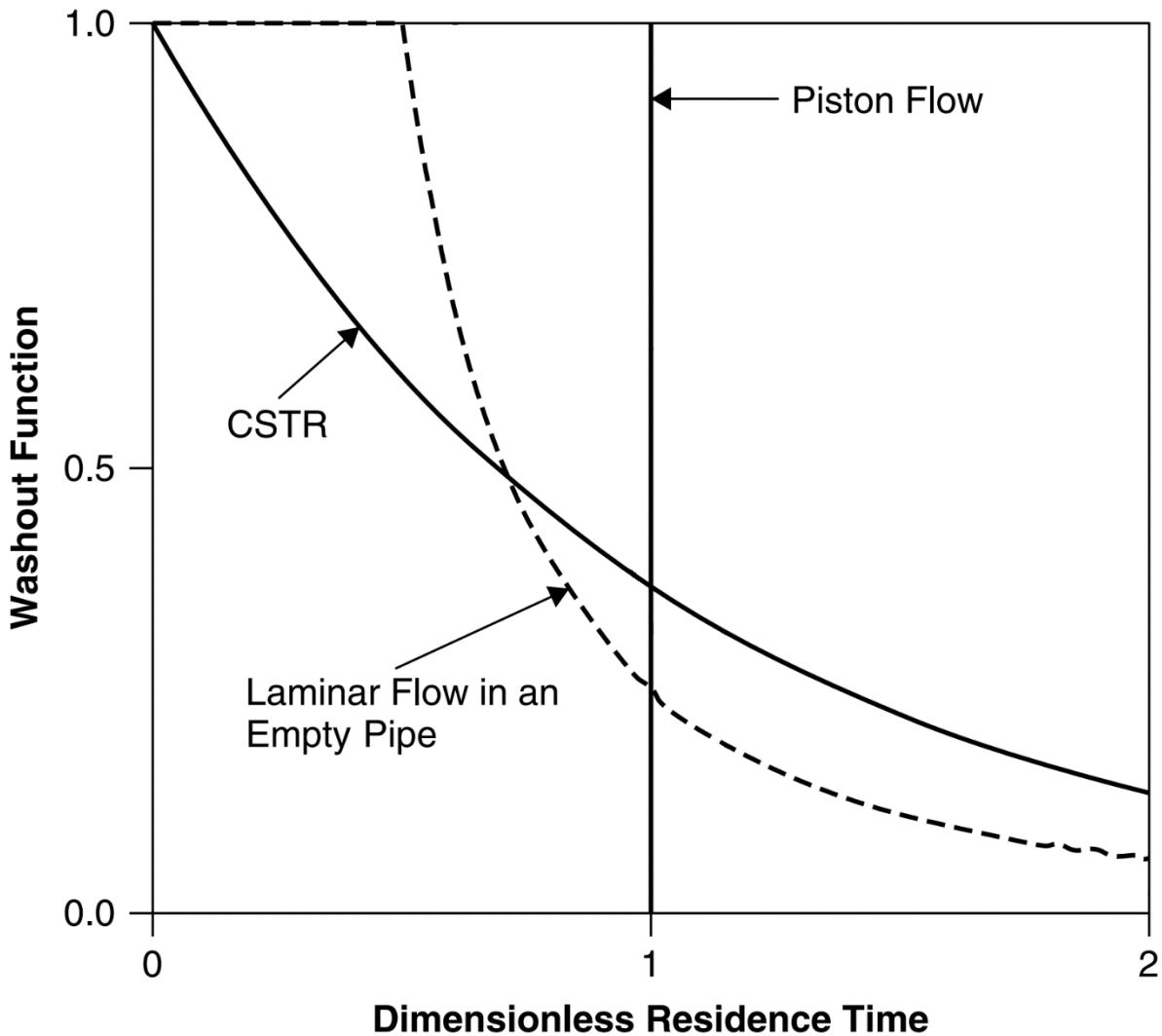


Abbildung 2-3 Verweilzeitverteilungen verschiedener Reaktormodelle. Abbildung übernommen von [Pau-2004].

### 2.3.5 Kontinuierlich gerührte Tankreaktoren

Ein CSTR ist ein weitverbreitetes Reaktormodell in der chemischen Verfahrenstechnik. Es zeichnet sich aus durch eine kontinuierliche Zuführung der Reaktanden und eine kontinuierliche Entnahme der Produkte. Im Inneren des CSTR sorgt ein Rührwerk für eine konstante Durchmischung der Reaktionsmasse. Es wird angenommen, dass die Mischung perfekt ist und eine sofortige gleichmäßige Dispersion erreicht wird. Dadurch sind alle Konzentrationen im gesamten Volumen und am Ausgang gleich. Aufgrund der perfekten Durchmischung im CSTR verlässt der Tracer den Reaktor nicht abrupt, sondern die Konzentration des Tracers im Ausgang des Reaktors verringert sich allmählich gemäß einer Exponentialfunktion [Wan-2022][Pau-2004].

Mathematisch wird die Auswaschfunktion für einen CSTR durch die Gleichung

$$W(t) = e^{-\frac{t}{\bar{t}}} \quad (2-9)$$

und

$$f(t) = \frac{1}{\bar{t}} \cdot e^{-\frac{t}{\bar{t}}} \quad (2-10)$$

beschrieben, wobei  $W(t)$  die Konzentration des Tracers zur Zeit  $t$  und  $\bar{t}$  die mittlere Verweilzeit der Flüssigkeit im Reaktor ist. Die exponentielle Abnahme der Tracer Konzentration reflektiert die kontinuierliche Verdünnung des Tracers durch die nachströmenden Reaktanden und die homogene Verteilung der Reaktionsmischung durch das Rührwerk (siehe Abbildung 2-3) [Pau-2004].

### 2.4 Methoden zu Messung der Partikelverweilzeit

Die experimentelle Ermittlung der Charakteristiken der Verweilzeitverteilung in verfahrenstechnischen Systemen wird typischerweise unter Einsatz einer geeigneten Signal-Antwort-Technik vollzogen. Diese Technik basiert auf der Verwendung von Tracer-Substanzen, die so ausgewählt werden, dass ihre Veränderungen in der Konzentration nach einer gezielten Störung am Eingang des Systems präzise verfolgt werden können. Solche Störungen werden zur Untersuchung der RTD eingeführt und umfassen im Wesentlichen zwei Haupttypen: den Impuls und den Schritt. Beim Impuls handelt es sich um die plötzliche Injektion einer definierten Menge der Tracersubstanz am Systemeingang, während der Schritt eine abrupte Änderung der Tracer-Konzentration von einem stationären Zustand zu einem anderen darstellt [Waj-2007].

Forschungsarbeiten, wie die von Ziegler und Aguilar sowie Tsai und Lin, haben gezeigt, dass insbesondere negative Schrittänderungen in der Feststoffflussrate substantielle Veränderungen der RTD nach sich ziehen. Weshalb sie ein effektives Mittel zur RTD-Messung darstellen können [Zie-2003][Tsa-1994]. Song et al. erweiterten diese Methodik durch die Einführung einer dynamischen Schritteingabemethode zur Ermittlung der mittleren Verweilzeit (MRT), indem sie sowohl positive als auch negative Veränderungen in der Feststoffflussrate nutzten [Son-2003].

Das Spektrum der für Messungen verwendeten Tracer ist vielfältig und umfasst unter anderem Farbige Tracer (UV, phosphoreszierend, Farbpartikel), elektrisch leitfähige Tracer gefolgt von magnetisch empfänglichen Tracern und radioaktiven

Verbindungen. Diese breite Palette ermöglicht eine maßgeschneiderte Auswahl der Messmethodik, abgestimmt auf die individuellen Merkmale des zu untersuchenden Systems.

### **2.4.1 Radioaktiver Tracer**

Dieses Verfahren beginnt mit der sorgfältigen Auswahl eines radioaktiven Tracers, der idealerweise keine Wechselwirkungen mit den Systemkomponenten eingeht und dessen Strahlung leicht durch spezialisierte Detektoren erfassbar ist. Die Halbwertszeit des gewählten Tracers muss lang genug sein, um die Durchführung der Messungen zu ermöglichen, Er sollte jedoch keine langfristigen Kontaminationsrisiken bergen [Tod-1975].

Nach der Auswahl wird der Tracer gezielt in das System injiziert. Das erfolgt abhängig von den spezifischen Anforderungen der RTD-Analyse entweder in Form eines kurzen Impulses für eine einmalige Zugabe oder als kontinuierlicher Strom [Waj-2007] [Raw-2013]. Im nächsten Schritt kommt die Erkennung der Tracer ins Spiel: Entlang des Strömungsweges platzierte Detektoren, die für die radioaktive Strahlung des Tracers sensibilisiert sind, messen dessen Durchgang und Konzentration an verschiedenen Stellen des Systems. Diese Messungen liefern wertvolle Daten, die eine detaillierte Analyse der Verweilzeit des Tracers und seiner Verteilung ermöglichen [Yia-2017] [Wol-1976].

Obwohl die Nutzung radioaktiver Tracer eine Methode mit hoher Sensitivität und Genauigkeit darstellt, erfordert sie eine strikte Beachtung von Sicherheitsmaßnahmen zum Schutz vor der Exposition gegenüber radioaktiver Strahlung. Die Methode ist insbesondere in komplexen Systemen von unschätzbarem Wert, in denen konventionelle Tracing-Techniken möglicherweise nicht anwendbar oder wirksam sind.

### **2.4.2 Farbige Tracer**

Die Bestimmung der Verweilzeitverteilung farbiger Tracer ist eine visuell intuitive und effektive Methode, um die Mischungs- und Strömungseigenschaften in einem verfahrenstechnischen System zu untersuchen. Diese Technik wird häufig in Systemen angewendet, die man optisch einsehen kann. Der grundlegende Prozess beinhaltet mehrere Schritte, die nahtlos ineinandergreifen, um präzise und aussagekräftige Daten zu generieren [Tod-1975].

Zunächst wird ein geeigneter Tracer ausgewählt, der sich durch eine deutliche Sichtbarkeit auszeichnet und keine chemische Reaktion mit den Komponenten des Systems eingeht. Die Auswahl des Farbstoffs hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie

beispielsweise der Löslichkeit im Trägermedium, der Farbintensität und der Beständigkeit gegenüber den Bedingungen im System [Raw-2013].

Ist der Farbstoff ausgewählt, injiziert man ihn an einem zuvor definierten Punkt in das System. Es gibt zwei Möglichkeiten die Injektion durchzuführen. Erstens, als einzelnen, kurzzeitigen Impuls, um die Reaktion des Systems auf eine plötzliche Veränderung zu messen. Oder zweitens, als kontinuierliche Zugabe, um den Effekt einer dauerhaften Veränderung der Eingangsbedingungen zu untersuchen [Raw-2013] [Waj-2007]. Die präzise Kontrolle der Farbstoffzugabe ist entscheidend, um aussagekräftige Daten zu erhalten.

Sobald der Farbstoff ins System eingebracht ist, wird seine Bewegung durch das System visuell verfolgt. Dies kann entweder direkt durch Beobachtung mittels Videotechnik erfolgen, oder mithilfe anderer Detektoren, die es ermöglichen, die Ausbreitung des Farbstoffs im Laufe der Zeit festzuhalten [Bre-1980] [A.T-2002] [Pou-2003] [Hu-1999] [Zha-2017] [A.T-2002] [Gao-2012]. Die visuelle Aufzeichnung bietet ein klares Bild der Strömungsmuster, Mischungseffizienz und potenzieller Problembereiche innerhalb des Systems [Dau-2008] [Pou-2003].

Zur Analyse der aufgezeichneten Daten wertet man die Bewegung und Verdünnung des Farbstoffs über die Zeit aus. Das erfolgt einerseits durch Messung der Zeit, die der Farbstoff benötigt, um verschiedene Punkte im System zu erreichen. Andererseits können durch die Beobachtung seiner Ausbreitung Rückschlüsse auf die Verweilzeitverteilung der Flüssigkeit oder des Gases im System gezogen werden.

Die Verwendung von farbigen Tracern zur Bestimmung der RTD ist aufgrund ihrer Einfachheit und der direkten visuellen Rückmeldung besonders vorteilhaft. Sie ermöglicht eine schnelle und anschauliche Bewertung der Mischungs- und Strömungseigenschaften.

### **2.4.3 Leitfähige Tracer**

Die Bestimmung der RTD mittels Leitwertmessung ist eine Technik, die insbesondere in Systemen mit wässrigen Lösungen zur Anwendung kommt [Yia-2017]. Dieses Verfahren nutzt den elektrischen Leitwert als Indikator für die Anwesenheit und Konzentration eines gelösten Tracers. Der Aufbau für eine solche Messung umfasst typischerweise die Zugabe eines Tracer-Stoffes, dessen elektrischer Leitwert sich deutlich vom Leitwert des Trägermediums unterscheidet [CHO-1998].

Zu Beginn wird der Tracer an einem spezifischen Punkt des Systems eingeführt, oft am Eingang des Reaktors oder der Rohrleitung. Wie bereits bei den farbigen Tracern kann auch hier die Einführung als kurzer Impuls erfolgen, um eine plötzliche Veränderung zu erzeugen, oder als kontinuierliche Zugabe, um eine dauerhafte Veränderung im System zu simulieren [Dic-1989] [Waj-2007]. Die Wahl zwischen diesen Methoden hängt von den spezifischen Zielen der RTD-Studie ab.

Nach der Tracer-Zugabe werden Leitwertmessgeräte verwendet, um die Veränderung der Leitfähigkeit des Mediums an verschiedenen Stellen im System oder am Ausgang über die Zeit zu erfassen [Yia-2017] [Unl-2002]. Die erfassten Daten geben Auskunft über die Geschwindigkeit und den Weg des Tracers durch das System. Indem die Zeitpunkte analysiert werden, zu denen die Leitfähigkeitsänderungen festgestellt wurden, lässt sich die Verweilzeitverteilung der Partikel im System bestimmen [Tod-1975].

### **2.4.4 Magnetisch empfindliche Tracer**

Die Bestimmung der RTD mittels magnetisch empfindlicher Tracer ermöglicht es, die Strömungscharakteristik und Mischprozesse in verfahrenstechnischen Systemen zu untersuchen. Diese Technik beruht auf der Einführung von magnetisch reaktiven Partikeln in das System und deren Detektion durch spezialisierte magnetische Sensoren entlang des Strömungspfades [Pua-2000]. Die magnetischen Tracer bieten den Vorteil, auch in opaken oder chemisch reaktiven Medien eingesetzt werden zu können, in denen herkömmliche Tracer-Technologien versagen [Pua-2000].

Der Aufbau für eine RTD-Messung mit magnetischen Tracern beginnt mit der Einführung dieser Tracer in das System an einem definierten Startpunkt, oft am Eingang des Reaktors oder der zu untersuchenden Rohrleitung. Die Zugabe kann entweder als kurzer Impuls erfolgen, oder als kontinuierlicher Fluss [Raw-2013].

Um die Bewegung und Verteilung der magnetischen Tracer im System zu verfolgen, werden entlang des Strömungsweges spezielle Detektoren platziert, die auf die magnetischen Eigenschaften der Tracer ansprechen. Diese Detektoren können Veränderungen im magnetischen Feld erkennen, die durch die Anwesenheit der Tracer verursacht werden, und ermöglichen so eine genaue Erfassung ihrer Bewegung durch das System [Pua-2000].

Die Verwendung von magnetisch empfindlichen Tracern für die RTD-Messung bietet den Vorteil, dass sie in einer Vielzahl von Medien eingesetzt werden können. Das schließt insbesondere auch solche ein, in denen optische oder elektrische Messmethoden aufgrund von Trübung, chemischer Reaktivität oder anderen Faktoren nicht



praktikabel sind. Zudem ermöglicht diese Methode eine nicht-invasive Messung, die die normalen Betriebsbedingungen des Systems nicht stört.



## 3 Materialien und Methoden

### 3.1 Beschreibung des betrachteten Extrusionssystems

Abbildung 3-1 zeigt ein gradationsbereites Extrudierungssystem (GRES). Dieses System ermöglicht eine effizientere Ressourcennutzung und multifunktionale Gestaltung von Komponenten, indem es die Materialeigenschaften während des Mischens und Extrudierens von Beton abstuft. Das GRES erleichtert die Extrusion verschiedener Materialien durch Anpassung des Partikeleingangs. Mischen und fördern von normalem Beton (Sand) bis hin zu Leichtbeton (Poraver) wird dadurch ermöglicht. Während des Mischprozesses verschiedener Materialien beeinflusst das GRES das Materialzufuhrverhältnis, die Geschwindigkeit der Materialzufuhr und die Drehgeschwindigkeit der Mischwelle die Qualität des Mörtels.

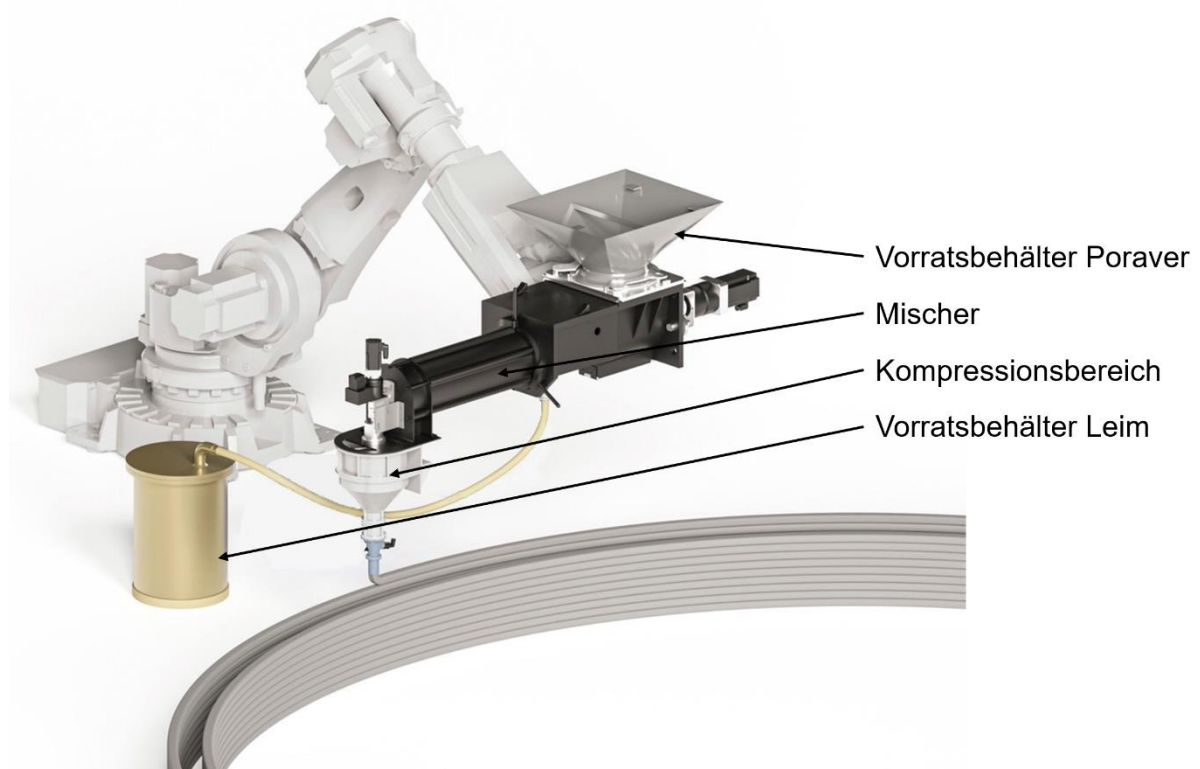


Abbildung 3-1 Rendering des GRES V1.3 in der Peripherie, Quelle: cbm, fml TUM, P. Schneider

#### 6-Achs Gelenkroboter

Der gesamte Extrusionsbereich wird von einem KUKA KR 210L150-2 2000 getragen. Dieser Roboter dient dazu die Bewegungsanforderungen des 3DCP zu erfüllen. Durch die sechs Achsen des Roboters kann das Extrusionswerkzeug in nahezu jede Position

oder Orientierung bewegt werden. Durch diese Flexibilität können komplexe Strukturen mit variierenden Geometrien und Überhängen erstellt werden, ohne, dass manuelle Eingriffe oder umständliche Neukonfigurationen der Hardware erforderlich sind. Der Roboter kann kontinuierliche Bahnen folgen, die durch die 3D-Drucksoftware vorgegeben werden, um Schichten von Beton mit präziser Steuerung der Bewegungsgeschwindigkeit abzulegen.

#### **Vorratsbehälter Zuschlagstoffe**

Der Vorratsbehälter ist für verschiedene Zuschlagstoffe wie Sand, Kies und Poraver geeignet. Er wird chargenweise befüllt, und hält eine gewisse Menge an Materialien für die Beton- bzw. Mörtelmischung bereit. Die Entleerung des Behälters erfolgt durch eine mit dem Mischantrieb gekoppelte Förderschnecke, die eine kontinuierliche und gleichmäßige Materialzufuhr in den Mischprozess ermöglicht.

Besonders an diesem System ist seine Fähigkeit, die Fördermenge der Zuschlagstoffe direkt über die Drehzahl des Mischantriebs zu steuern. Durch die Anpassung der Drehzahl kann die Menge der in den Mischer geförderten Zuschlagstoffe präzise reguliert werden, wodurch er sich an unterschiedliche Betonrezepturen und Mischungsverhältnisse anpassen kann. Diese Funktionalität gewährleistet eine konsistente Qualität des Betons und gestaltet den Materialverbrauch effizient.

#### **Vorratsbehälter Leim**

Als Vorratsbehälter für den Leim dient ein robustes, einfach gehaltenes Fass mit einer Kapazität von 120 Litern. Innerhalb dieses Fasses ist ein konventioneller Wendelrührer installiert, der kontinuierlich durch einen PFT Mixer Nr. 12921 auf einer festgelegten Geschwindigkeitsstufe (Stufe 2) angetrieben wird (siehe Abbildung 3-2). Dieses permanente Mischverfahren reduziert Ablagerungen signifikant und verhindert effektiv das Entmischen des Mörtels. Dadurch wird eine gleichbleibende Konsistenz und Qualität des Leims gewährleistet.

Der Prozess beginnt damit, dass der Leim in einem PFT Multimix in Chargen sorgfältig vorbereitet wird (siehe Abbildung 3-3,). Nachdem der Mörtel in diesem Mixer zu einer homogenen Masse angemischt wurde, wird er anschließend in das Fass umgefüllt. Dort wird er für die weitere Aufbewahrung und Bereitstellung gelagert.

Mithilfe einer Verderflex DURA 15 Schlauchpumpe wird der Leimmörtels aus dem Fass zum Mischer befördert. Die Fördermenge dieser Schlauchpumpe kann unabhängig vom restlichen Extrusionssystem gesteuert werden. Diese unabhängige Steuerung ermöglicht eine präzise Anpassung der Fördermenge basierend auf der Viskosität des Leims und dem daraus resultierenden Bedarf für die Mörtel-/Betonmischung.

### 3 Materialien und Methoden



Abbildung 3-2 Links: Leimfass mit PFT Mixer Rechts: Wendelrührer



Abbildung 3-3 Leim Mischer



#### **Mischer**

Der Mischer besteht aus einem M-TEC D10 der mit diversen Modifikationen ausgestattet wurde. Er besteht aus einer Mischwelle, die in einem flexiblen Zylinder aus hochwertigem Kunststoff rotiert und an beiden Enden gelagert ist. Ergänzt wurde er mit einem drehzahlgeregelten Motor, für eine präzise Steuerung der Mischgeschwindigkeit. Darüber hinaus wurde der Mischer so modifiziert, dass die effektive Länge der Mischwelle verändert werden kann, ohne eine strukturelle Modifikation am Gerät selbst zu verändern ist.

Eine klemmbare Stauscheibe (siehe Abbildung 3-4) und zusätzlichen verschließbaren Endöffnungen ermöglicht diese Funktion. Diese Modifikation erlaubt die Probenentnahme mit unterschiedlichen Mischlängen und daraus resultierenden unterschiedlichen Mischenergien. Eine Verkürzung der Länge der Mischwelle bedeutet allerdings, dass der Kompressionsbereich nicht mehr genutzt werden kann. Da in dieser Arbeit aber im speziellen nur die Partikelverweilzeit des Mixers betrachtet wurde hat das keinen Einfluss auf die durchgeführten Versuche.



Abbildung 3-4 Mischwelle mit aufgeklemmter Stauscheibe

#### **Kompressionsbereich**

Die Funktionsweise des Mixers das Material in unregelmäßigen Abständen und nicht kontinuierlich zu fördern, stellt für die Anwendungen des 3DCP eine Herausforderung dar, da dies eine gleichmäßige Materialzufuhr benötigt. Um diese Herausforderung zu bewältigen und eine konstante Materialförderung zu gewährleisten, wurde der sogenannte Kompressionsbereich entwickelt. Dieser Bereich fungiert als eine Art Miniatur-Vorratsbehälter. Er bildet eine kritische Brücke zwischen dem

intermittierenden Förderprozess des Mixers und der Notwendigkeit einer gleichbleibenden Materialzufuhr an der Druckdüse.

Der Kompressionsbereich ist mit einer eigenen, speziell konfigurierten Welle ausgestattet, deren Drehzahl präzise gesteuert werden kann. Durch diese Steuerung lässt sich der Volumenstrom des Materials, das zur Druckdüse geführt wird, fein justieren. Diese Anpassungsfähigkeit ist entscheidend, um aus dem diskontinuierlichen Volumenstrom, der vom Mixer kommt, einen konstanten und kontrollierten Volumenstrom an der Druckdüse zu erzeugen.

Die Integration eines Füllstandsensors im Kompressionsbereich ermöglicht es zudem die Fördermenge des Mixers dynamisch anzupassen. Basierend auf den realen Daten über den Materialstand im Kompressionsbereich kann das System automatisch die Zufuhr aus dem Mixer regulieren, um eine optimale Füllmenge aufrechtzuerhalten.

### **3.2 Auswahl und Charakterisierung der verwendeten Materialien**

#### **3.2.1 Auswahl und Charakterisierung der Tracer-Partikel**

Die sorgfältige Auswahl und umfassende Charakterisierung von Tracer-Partikeln sind entscheidende Schritte bei der Durchführung von RTD-Experimenten. Bei der Auswahl von Tracer-Partikeln ist es von größter Wichtigkeit, dass diese chemisch inert sind, um keine unerwünschten Reaktionen mit dem System oder dessen Komponenten einzugehen. Um die Strömung nicht zu beeinflussen, müssen sie in ihren physikalischen Eigenschaften, wie Dichte und Viskosität der zu untersuchenden Flüssigkeit oder dem Gas ähneln. [Seb-2019] [Raz-2023]

Eine leichte Auffindbarkeit der Tracer ist ebenfalls ein kritisches Kriterium; sie sollten über eindeutige Signale oder Eigenschaften verfügen, die ihre Identifizierung und Quantifizierung ermöglichen, ohne von Hintergrundsignalen verdeckt zu werden. Die Stabilität der Tracer über die gesamte Dauer des Experiments hinweg ist ebenfalls essentiell; sie dürfen nicht zerfallen, verdampfen oder ihre Auffindbarkeit auf andere Weise verlieren. [Raz-2023]

Nach der Auswahl müssen die Tracer-Partikel gründlich charakterisiert werden. Dies beinhaltet die Analyse ihrer Größenverteilung und Morphologie, um sicherzustellen, dass sie repräsentativ für die untersuchte Strömung sind. Die Löslichkeit und Dispergierbarkeit in der Trägerflüssigkeit bzw. die Fähigkeit zur gleichmäßigen Verteilung im

Trägergas sind ebenfalls zu prüfen, da sie für die Genauigkeit der RTD-Messungen entscheidend sind. Die Methoden zur Erkennung der Tracer müssen in Bezug auf Signalstärke und -stabilität ausgewählt werden, um die Empfindlichkeit und Zuverlässigkeit der Messungen zu garantieren. Besonders in reaktiven Systemen ist die Reaktionskinetik der Tracer zu untersuchen, selbst wenn sie als inert angesehen werden, um vollständig zu verstehen, wie sie sich im System verhalten. [Raz-2023]

*Tabelle 3-1 Entscheidungsmatrix Tracerauswahl. A = Gesundheitsrisiko, B = Entsorgungsaufwand, C = Materialkosten, D = Detektierbarkeit, E = Reinigungsaufwand, F = Aufwand Detektierbarkeit, G = Homogenität mit Material*

| 1 gut - 10 schlecht | A  | B  | C | D | E | F  | G | Gesamt |
|---------------------|----|----|---|---|---|----|---|--------|
| Phosphoreszierend   | 4  | 1  | 3 | 7 | 3 | 7  | 3 | 28     |
| Farbstoff           | 3  | 1  | 3 | 7 | 3 | 7  | 4 | 28     |
| radioaktiv          | 10 | 10 | 6 | 1 | 8 | 7  | 1 | 43     |
| Leitfähigkeit       | 2  | 1  | 1 | 3 | 3 | 3  | 2 | 15     |
| fluoreszierend      | 4  | 1  | 3 | 7 | 3 | 7  | 3 | 28     |
| magnetisch empf.    | 1  | 1  | 3 | 2 | 4 | 10 | 2 | 23     |

In der Entscheidungsmatrix von Tabelle 3-1 sind die potenziellen Tracer-Partikel hinsichtlich ihrer spezifischen Anforderungen für den geforderten Einsatz sowie einiger persönlicher Präferenzen bewertet worden. Die Bewertungsskala reicht dabei von 1, 'Gut', bedeutet, bis zu 10, 'Schlecht'.

Im Hinblick auf ein mögliches Gesundheitsrisiko standen die Fragen im Vordergrund, wie leicht eine Kontamination der beteiligten Personen durch den Einsatz von Tracern auftreten kann und welche gesundheitlichen Folgen daraus resultieren könnten. Bei der Bewertung des Entsorgungsaufwands wurde untersucht, ob die Materialien, die für die Versuche unter Zugabe von Tracern genutzt wurden, auf dieselbe Weise entsorgt werden können wie jene ohne Tracer-Einsatz. Die Materialkosten berücksichtigen den finanziellen Aufwand für die Beschaffung der Tracer.

Die Entdeckbarkeit der Tracer gibt Aufschluss darüber, wie gut diese innerhalb einer Mörtelmischung identifizierbar sind. Der Reinigungsaufwand bewertet den zusätzlichen Aufwand, der für die Säuberung des Versuchssystems nach Einsatz von Tracern notwendig ist. Unter den Aufwand der Entdeckbarkeit bzw. Detektierbarkeit fällt der technische und zeitliche Mehraufwand, der für Anpassungen am bestehenden System oder für die Programmierung zur Erkennung notwendig ist. Zusätzlich wird die Zeit eingerechnet, die pro Versuch für die Erkennung der Tracer aufgewendet werden



muss. Die Homogenität im Material bezieht sich darauf, inwieweit die Zugabe von Tracern die Beschaffenheit der Mörtelmischung beeinflusst. Dabei wird berücksichtigt, ob sie als Emulsion oder in Form von trockenen Partikeln hinzugefügt werden.

Zusammenfassend zeigt die Analyse der Entscheidungsmatrix, dass die Messung der Leitfähigkeit als die vorteilhafteste Methode zur Bestimmung der Verweilzeit von Partikeln hervorgeht. Auf dem zweiten Platz befindet sich die Anwendung von magnetisch empfänglichen Tracern, gefolgt von verschiedenen Methoden, die den Einsatz von farbigen Partikeln beinhalten. Deutlich weniger attraktiv, aufgrund der damit verbundenen Nachteile, erweist sich der Gebrauch radioaktiver Tracer.

### 3.2.2 Zusammensetzung der Mörtelmischung

Der untersuchte Mörtel, mit einem spezifischen Gewicht von etwa  $1169 \text{ g/dm}^3$ , lässt sich der Kategorie des Leichtmörtels zuordnen. Seine Mischformel umfasst einen Anteil Leim zu zwei Anteilen Poraver (Verhältnis 1:2). Das verwendete Poraver besteht aus einer Kombination verschiedener Korngrößen: 35 m% der Partikel haben einen Durchmesser von 0,1 bis 0,3 mm, 24 m% liegen im Bereich von 0,25 bis 0,5 mm, 18 m% zwischen 0,5 und 1,0 mm und die restlichen 23 m% zwischen 1,0 und 2,0 mm.

Die Zusammensetzung des Leims setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen: 20,7 m% Wasser, 0,4 m% Fließmittel zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit, 13,8 m% Silikasuspension, 61,9 m% Zement als Bindemittel, 2,5 m% Kalksteinmehl und 0,6 m% Pigmente für die Farbgebung. Damit die Druckbarkeit des Materials bei stets gleichen Parametern gegeben ist muss das Ausbreitmaß des Leims zwischen 34 und 38 cm liegen. Bei einer Überschreitung wird gegebenenfalls mit Thixotropiemittel nachgebessert. Diese sorgfältig abgewogene Mischung trägt dazu bei, die gewünschten Eigenschaften des Mörtels wie Verarbeitbarkeit und Festigkeit zu erreichen.

## 3.3 Versuchsdesign

Für die Durchführung einer Untersuchung zur Verweilzeitverteilung in einem Mörtelmischer wird ein umfassendes Versuchsdesign benötigt. Im Zentrum unserer Forschung steht die Frage, wie effektiv der Mörtelmischer Materialien homogenisiert und welche RTD sich für verschiedene Mischlängen ergibt wobei sich diese Arbeit nur mit der RTD beschäftigt. Die zugrundeliegende Hypothese besagt, dass der Mörtelmischer eine gleichmäßige Verteilung der Materialien ermöglicht, was sich in einer engen Verweilzeitverteilung widerspiegeln sollte.

Das Versuchsdesign integriert eine Vielzahl von Variablen, um eine umfassende Analyse zu ermöglichen. Zu den unabhängigen Variablen zählen die Art und Zusammensetzung der Zuschlagstoffe, die genaue Rezeptur des Leims, das Verhältnis zwischen Leim und Poraver sowie die Drehzahl des Mixers. Als Kernstück der Studie dient die Messung der RTD entlang verschiedener Längen des Mischbereichs, welche die abhängige Variable darstellt.

Um die Konsistenz der Versuchsbedingungen zu gewährleisten, werden bestimmte Faktoren konstant gehalten. Dazu gehört das standardisierte Anrühren des Leims vor jeder Versuchsreihe, um sicherzustellen, dass die Ausgangszusammensetzung des Leims in jedem Experiment identisch ist. Ebenso wird darauf geachtet, dass sich der Mörtel stets in einem druckbaren Zustand befindet, was eine wesentliche Voraussetzung für die Anwendbarkeit darstellt. Durch die Kontrolle dieser Faktoren zielt das Design darauf ab, die Zuverlässigkeit und Aussagekraft der gewonnenen Daten zu maximieren und einen direkten Bezug zur Praxis herzustellen.

Der Plan sieht eine Querschnittsstudie vor, in der verschiedene Mischlängen systematisch variiert werden, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Als Teil der Messmethodik wird ein geeigneter, chemisch inerte Tracer ausgewählt, der die Bewegung der Mischkomponenten nicht beeinträchtigt. Die Erkennbarkeit dieses Tracers erfolgt über spezielle Sensoren oder Kameras, die im Mischprozess positioniert werden.

Die Erfassung der Daten erfolgt mithilfe eines exakten Verfahrens, das den Beginn der Messung mit der Einführung des Tracers in den Mixer synchronisiert. Sorgfältig werden sowohl die Zeitpunkte als auch die Positionen dokumentiert, an denen der Tracer innerhalb des Mixers identifiziert wird. Diese präzisen Aufzeichnungen dienen als essenzielle Basis für die nachfolgende statistische Auswertung. Zudem berücksichtigt das Versuchsdesign ethische Gesichtspunkte, mit einem besonderen Augenmerk auf die Sicherheit und die Umweltfreundlichkeit des verwendeten Tracers. Dabei wird sehr großer Wert darauf gelegt, dass der Tracer keine gesundheitlichen Risiken für das Bedienpersonal darstellt und keine negativen Auswirkungen auf die Umwelt hat.

## 4 Experimentelle Untersuchungen

---

### 4.1 Versuchsplanung

#### 4.1.1 Planung für Leitwertmessung

Auf der Grundlage der in Tabelle 3-1 dargestellten Ergebnisse wurde eine detaillierte Planung für die Messung der Verweilzeitverteilung (RTD) mittels Leitfähigkeitsmessung entwickelt. Dabei war es besonders wichtig eine umfassende und präzise Messmethode einzubauen, die den Weg des Tracers durch den Mörtelmischer genau nachverfolgen kann. Hierfür wurde geplant, zuerst zwei kritische Messpunkte im System zu positionieren: einen direkt am Eingang des Mixers und den anderen am Ausgang.

Die Positionierung einer Messstelle am Eingang des Mixers ist strategisch gewählt, um den genauen Zeitpunkt festzuhalten, zu dem der Tracer in das System eingeleitet wird. Diese Information ist von entscheidender Bedeutung, da sie den Startpunkt für die Erfassung der RTD markiert. Der zweite Messpunkt am Ausgang des Mixers dient der Erfassung von Veränderungen in der Leitfähigkeit der Mörtelmischung, die durch die Präsenz des Tracers verursacht werden. Die Messsonde am Ausgang ist dabei das zentrale Instrument, da es die Leitfähigkeitsänderungen erkennt und somit Rückschlüsse auf die Verweildauer und Konzentration des Tracers im System ermöglicht.

Um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Messungen zu gewährleisten, werden zuvor durchgeführte Kalibrierungsmessungen durchgeführt. Diese Kalibrierungen sind essenziell, um eine korrekte Interpretation der Leitfähigkeitsdaten zu ermöglichen. Sie erlauben es, die gemessenen Leitwerte am Ausgang des Mixers präzise in Tracerkonzentrationen umzurechnen. Durch diesen Ansatz kann nicht nur die Verweilzeit des Tracers im Mixer bestimmt werden, sondern es lassen sich auch wichtige Rückschlüsse auf das Misch- und Strömungsverhalten innerhalb des Mixers ziehen.

Typischerweise wird der Mixer nur zu etwa 30% seines Volumens gefüllt. Damit die Messsonde nun permanent mit dem Mischgut in Kontakt steht und dadurch eine genaue Messung gewährleistet ist, muss diese sinnvoll positioniert werden. Die beste Lösung für diese Herausforderung ist die Platzierung der Sonde an der Unterseite des Mixers, wodurch die sich die Messsonde permanent im Material befindet.

## 4 Experimentelle Untersuchungen

---

Um jedoch potenzielle Schäden an der Sonde und dem Mischer selbst zu vermeiden, ist es besonders wichtig auf eine präzise Steuerung der Einführungstiefe der Sonde zu achten. Sie muss so positioniert werden, dass ihr Ende exakt mit der Innenseite des Gehäuses der Mischwelle abschließt und nicht darüber hinausragt. Diese Maßnahme minimiert das Risiko einer mechanischen Beschädigung durch die beweglichen Teile des Mixers und sichert die Langlebigkeit der Sonde sowie die Unversehrtheit des Mixers. Die Effektivität des Mischprozesses wird dabei nicht beeinträchtigt..

Bei der weiterführenden Recherche nach Messsonden, die für den Einsatz in Mörtel geeignet sind, sind zwei wesentliche Probleme aufgetreten. Erstens weisen alle untersuchten Messspitzen eine Bauform auf, die der in Abbildung 4-1 dargestellten Sonde gleich oder nur in geringem Maße davon abweichend ist. Ein kritischer Punkt dabei ist, dass bei der vorgesehenen Positionierung von unten Mörtel in die Verzahnungen der Sonde gelangt. Dies würde zu einer Blockade führen und ein Umströmen der Sonde mit dem Mörtel verhindern, wodurch die Messgenauigkeit erheblich beeinträchtigen könnte.



Abbildung 4-1 Bild einer Sonde zur Leitwertmessung Quelle: PHYWE, E. Tellbach

Zweitens haben mehrere Hersteller darauf aufmerksam gemacht, dass die Oberflächen der Messsonden sehr empfindlich sind. Bei dem geplanten Einsatz innerhalb des Mörtels, wo die Sonde direktem Kontakt mit dem abrasiven Material ausgesetzt ist, muss mit einer deutlich verkürzten Lebensdauer der Sonde gerechnet werden. Diese Empfindlichkeit stellt ein großes Hindernis dar, da die wiederholte Ersetzung der Sonden sowohl kosten- als auch zeitaufwendig wäre. Diese Technologien sind daher weniger für den Einsatz in einem Mörtelmischer geeignet.

Bei der Suche nach einer Lösung, um die aufgetretenen Probleme zu vermeiden, hatten wir die Idee, die Widerstandsmessung als eine alternative Methode in Erwägung zu ziehen. In Abbildung 3.3 ist der speziell für diese Messmethode entworfene Schaltplan dargestellt, der es ermöglicht, den elektrischen Widerstand des Mörtels zu ermitteln.

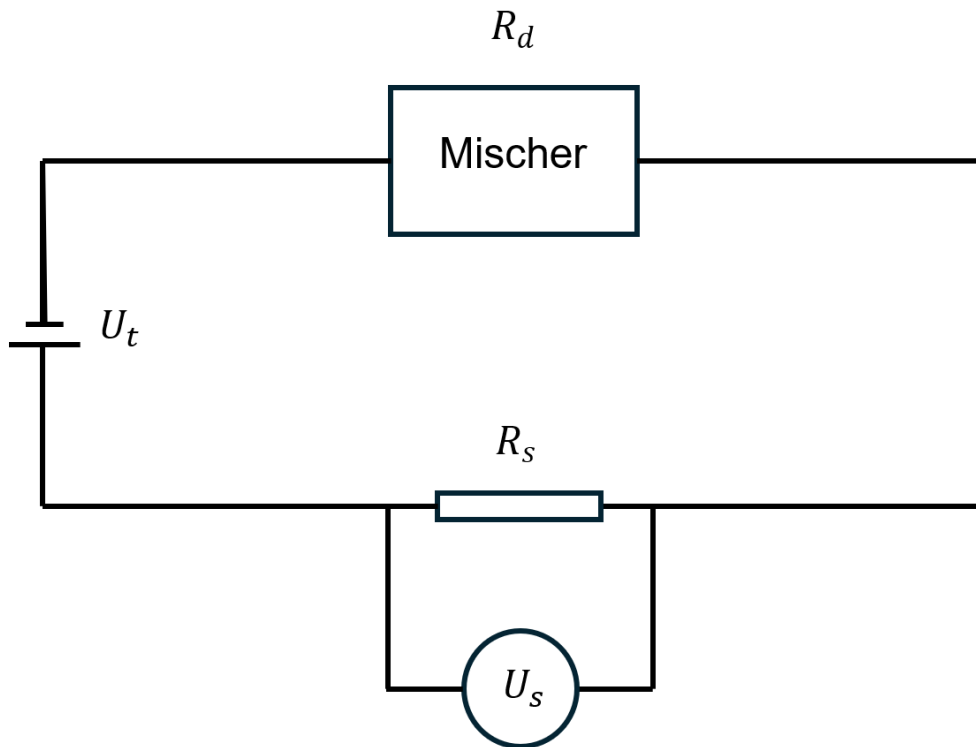


Abbildung 4-2 Elektrische Schaltung, um die elektrische Leitfähigkeit des Mörtels zu überwachen

Der Leitwert der in Abbildung 4-2 dargestellten Schaltung kann mit den folgenden Formeln berechnet werden:

$$I_s = \frac{U_s}{R_s} = \frac{U_t}{R_t} = \frac{U_t}{R_s + R_d} \quad (4-1)$$

$$R_d = \frac{U_t + R_s}{U_s} - R_s \quad (4-2)$$

$$G_d = \frac{1}{R_d} \quad (4-3)$$

Wobei  $I$  die Stromstärke,  $U$  die Stromspannung,  $R$  der Widerstand und  $G$  der Leitwert ist. Für die geplante Messung sind die Elektroden aus simplen Edelstahlstäben vorgesehen, die jeweils 5 mm im Durchmesser und 7 cm in der Länge messen. Die

notwendige Versorgungsspannung sowie die Erfassung und das Festhalten der Messdaten sollen über eine in der Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) des Systems verbauten Karte von Beckhoff erfolgen. Diese Konfiguration ermöglicht eine genaue Überwachung und Aufzeichnung des elektrischen Widerstands des Mörtels während des Experiments.

Als Zusatz zur Erhöhung des Leitwertes im Mörtel wurde Kaliumchlorid ausgewählt. Für die Zugabe der Tracer-Lösung ist der Einsatz eines Dreibege-Mischers vorgesehen, der zusammen mit einer zusätzlichen Leimmischung, die das Kaliumchlorid beinhaltet, verwendet wird. Diese Methode bietet den Vorteil, dass die Einführung des Tracers in den Mörtel nicht nur als Impuls, sondern auch kontinuierlich in gestuften Mengen realisiert werden kann. Das ermöglicht eine detailliertere Kontrolle und Anpassung der Experimentierbedingungen.

In ersten Vorversuchen ergaben sich unerwartete Schwierigkeiten. Sie wurden mit einem Multimeter durchgeführt, um den normalen Widerstand von Mörtel und Leim sowie die Auswirkungen der Salzzugabe auf diesen Widerstand zu erfassen. Es stellte sich heraus, dass die chemische Reaktion zwischen dem Zement und Wasser den Widerstand so stark und unvorhersehbar variieren ließ, dass keine zuverlässige und aussagekräftige Messung durchführbar war. Diese starken Schwankungen im Widerstand machten es unmöglich konsistente Daten zu gewinnen, wodurch die Verwendung dieser Methode für präzise Messungen fraglich war.

### 4.1.2 Planung für Fluoreszierende Tracer

Basierend auf einer Empfehlung wurde als nächster Schritt ein Plan zur Messung des Leitwerts unter Einsatz von fluoreszierenden Tracern entwickelt. Um die Zugabe der Tracer möglichst effizient und direkt am Mischer zu realisieren, wurde das in Abbildung 3.4 dargestellte Zwischenstück entworfen. Dieses Zwischenstück ist speziell für die Integration in die Leimzufuhr konzipiert. Mittels eines dünnen Schlauchs können die Tracer unmittelbar am Eingang zum Mischer zugeführt werden. Durch diese Anordnung kann eine vorzeitige Vermischung der Tracer mit dem Leim vermieden werden. Die Genauigkeit der Leitwertmessung wird dadurch erhöht und die Zuverlässigkeit der Ergebnisse wird.

Für die visuelle Erfassung des aus dem Mischer austretenden Materials war der Einsatz einer am Ausgang positionierten GoPro Kamera geplant. Um die fluoreszierenden Partikel unter diesen Bedingungen optimal sichtbar zu machen, sollte das Material zusätzlich mit einem Schwarzlichtstrahler beleuchtet werden. Für die Auswertung der so entstandenen Bilder war vorgesehen, ein speziell für die Charakterisierung von

Luftporen in Festbeton entwickeltes Programm anzupassen, das von Christian Maximilian Hechtl im Rahmen seiner Masterarbeit geschrieben wurde. Die Modifikation dieses Programms sollte die präzise Identifizierung der fluoreszierenden Partikel ermöglichen.



Abbildung 4-3 Zwischenstück für die Tracerzugabe

Für die anfänglichen Zuführtests wurden drei verschiedene flüssige fluoreszierende Substanzen sowie zwei fluoreszierende Materialien mit unterschiedlicher Körnung beschafft. Sowohl die Flüssigkeiten als auch die Pigmente mit einer Korngröße von 15  $\mu\text{m}$ , die mit Wasser zu einer Emulsion gemischt wurden, ließen sich problemlos mit einer Spritze in den jeweiligen Schlauch injizieren. Im Gegensatz dazu neigten Pigmente mit einer Größe von 50  $\mu\text{m}$  dazu, sich zu schnell vom Wasser zu trennen, was ihre Zuführung durch den Schlauch verhinderte.

Während der Tests zur Überprüfung der Sichtbarkeit stellte sich leider heraus, dass die färbende und benetzende Eigenschaft des Leims so stark ausgeprägt war, dass die Fluoreszenz völlig verdeckt wurde. Das Ergebnis war dabei unabhängig davon, ob es sich um Flüssigkeiten oder Pigmente handelte. Diese Beobachtung machte deutlich, dass die Verwendung von fluoreszierenden Tracern für diesen Verwendungszweck leider nicht geeignet ist.

### 4.1.3 Planung für magnetisch empfindliche Tracer

Bei der Suche nach geeigneten magnetisch empfindlichen Tracern stieß man auf ein interessantes Material: ein Filament, das mit Eisenpartikeln versetzt ist und speziell für den Einsatz in FLM 3D-Druckern entwickelt wurde. Das Produkt ist bekannt unter der Bezeichnung Protopasta Magnetic Iron PLA. Sein Durchmesser beträgt 1,75 mm und es hat eine spezifische Dichte von  $1850 \text{ g/dm}^3$ . Um es als Tracer in der Mörtelmischung zu verwenden, wird es auf kleine Segmente mit einer maximalen Länge von 2 mm zu geschnitten (siehe Abbildung 4-4). Diese Größe erlaubt dem Filament, sich größen- und gewichtsmäßig ideal zwischen den Hauptkomponenten des Mörtels zu positionieren. Der Mörtel besteht aus Leim mit einer spezifischen Dichte von  $1980 \text{ g/dm}^3$  und Poraver, einem Leichtzuschlagstoff mit einer Dichte von  $393 \text{ g/dm}^3$  und Partikelgrößen von 0,1 bis 2 mm Durchmesser.



Abbildung 4-4 Frisch geschnittene Tracerpartikel

Die optimale Anpassung der physikalischen Eigenschaften des Tracer-Materials an die des Mörtels lässt erwarten, dass sich die magnetisch empfindlichen Tracerpartikel im Mischprozess ähnlich wie die natürlichen Bestandteile des Mörtels verhalten. Das bedeutet, dass sie idealerweise weder die Konsistenz noch die Homogenität der Mörtelmischung negativ beeinflussen. Das schafft die Grundlage dafür, dass die Tracer sinnvoll zur Analyse der Mischvorgänge und zur Untersuchung der Verweilzeitverteilung innerhalb des Mixers eingesetzt werden können, ohne dass dabei die Qualität oder die Eigenschaften des Endprodukts verändert werden. Das Eisen-PLA-Filament eine vielversprechende Möglichkeit, präzise und störungsfreie Messungen in der Erforschung von Mischprozessen zu ermöglichen.

Die Einführung der Tracerpartikel in das Mischsystem erfolgt durch eine an der Oberseite angebrachte Bohrung, die sich direkt am Anfang der Mischstrecke befindet. Durch einen Trichter werden die Tracerpartikel in den Mischer geleitet. Für jeden



Durchlauf des Experiments ist vorgesehen, insgesamt 100 Tracerpartikel zu nutzen, für konsistente und vergleichbare Ergebnisse.

Der Mörtel samt Tracerpartikel wird anschließend in Eimern aufgefangen. Dabei ist jede Befüllung der Eimer auf eine Dauer von 10 Sekunden ausgelegt. Die Anzahl der so befüllten Eimer wird mit 30 Eimern pro Versuch geplant. Im Anschluss daran sollen die Eimer mit etwas Wasser aufgefüllt und der Inhalt gründlich vermischt werden, um das Herausfiltern der Tracerpartikel zu erleichtern. Für das Herausfischen der Partikel wird ein starker Magnet verwendet. Die auf diese Weise extrahierten Tracer werden anschließend gezählt. Die ermittelten Zahlen werden in einer Tabelle dokumentiert und zusammengetragen. Sie dient als Grundlage für die spätere detaillierte Analyse und Bewertung der Ergebnisse.

### 4.2 Durchführung der Experimente

Während der Kalibrierungsversuche traten unerwartete Herausforderungen auf, die zu notwendigen Anpassungen im experimentellen Aufbau führten. Insbesondere erwies sich die geplante Methode, die Tracerpartikel mittels eines Trichters in das System einzuführen, als nicht praktikabel. Der Hauptgrund für dieses Problem lag darin, dass Material, welches sich an der Mischwelle angesammelt hatte, die Öffnung des Trichters verstopfte. Die Tracer konnten dadurch nicht wie geplant in das Mischsystem eingefüllt werden.

Um das Problem der blockierten Trichteröffnung zu lösen, wurde eine neue Methode entwickelt. Hierfür wurde ein etwa 15 cm langes Edelstahlrohr verwendet, das einen Außendurchmesser von 16 mm besitzt sowie eine darauf abgestimmte 14er Gewindestange die als Stößel dient (siehe Abbildung 4-5). Zunächst wird ein Ende des Rohres mit einem Stück Schwamm verschlossen, um eine sichere Barriere zu schaffen. Anschließend werden die Tracer sorgfältig in das Rohr eingefüllt und mit einem weiteren Stück Schwamm am anderen Ende verschlossen, damit keine Partikel herausfallen können. Das so vorbereitete Rohr wird dann in das dafür vorgesehene Loch im Mischer eingeführt. Zum entscheidenden Zeitpunkt werden die Tracer mit dem Stößel, der durch das Rohr geführt wird, gezielt und stoßartig in das Mischsystem eingepresst. Eine am Stößel angebrachte Schlauchschelle fungiert als Anschlag, der ein zu tiefes Einführen des Stößels und somit eine potenzielle Kollision mit der Mischwelle verhindert. Damit soll die Sicherheit des Verfahrens und der Schutz der Mischeinrichtung gewährleistet werden.

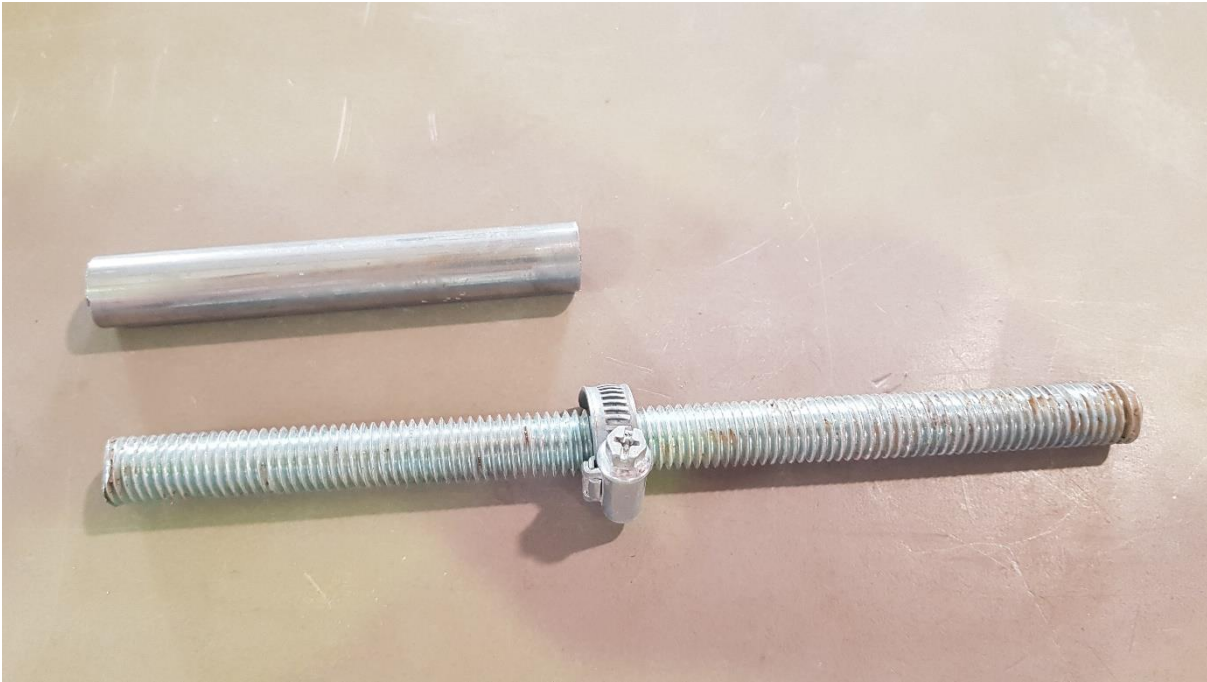


Abbildung 4-5 Rohr und Stößel für die Tracerzugabe

Auch die ursprünglich vorgesehene Position der Einfüllöffnung stellte sich ebenfalls als nicht ideal heraus, da das Risiko bestand, dass die Partikel nicht direkt ins Mörtelgemisch fielen, sondern stattdessen auf der in Abbildung 4-6 dargestellten blauen Dichtung landeten. Von dort aus könnten sie dann unkontrolliert in den Mischraum gelangen, was die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Tracer-Zugabe beeinträchtigen könnte.

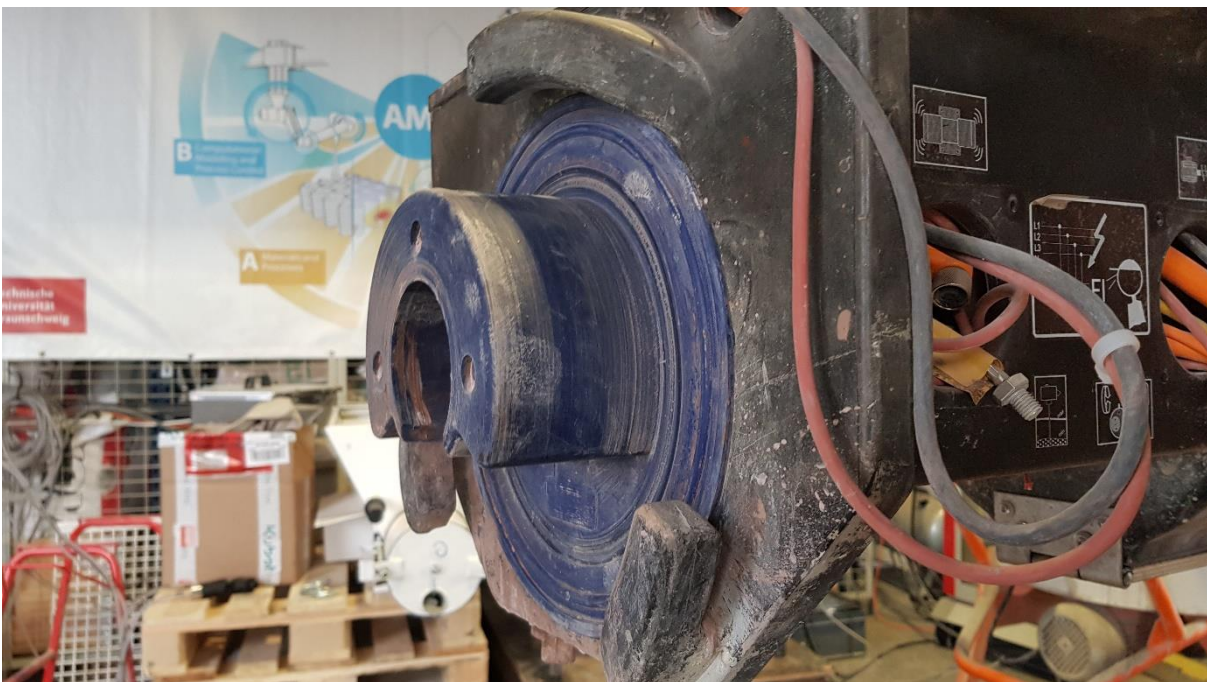


Abbildung 4-6 Dichtung am Anfang des Mischbereichs



Abbildung 4-7 Kurzer Mischbereich mit Rohr für Tracerzuführung

Um das beschriebene Risiko zu vermeiden, wurde die Position der Einfüllöffnung angepasst. Wie in Abbildung 4-7 ersichtlich, wurde die Öffnung in das untere Drittel des Mischbereichs verlegt. Zudem erfolgte die Anbringung der Öffnung auf der Seite, die der Rotationsrichtung des Mixers entgegengesetzt ist, um die Tracer möglichst direkt ins Material einzuspritzen und gleichzeitig zu verhindern, dass Material ungewollt austritt. Weiterhin wurde die Öffnung um 7 cm entlang der Mischrichtung verschoben, sodass sie nun vor der blauen Dichtung positioniert ist. Diese Maßnahme soll sicherstellen, dass der eventuelle Einfluss der Dichtung auf die Zugabe der Tracerpartikel möglichst vollständig verhindert wird, um eine präzise und kontrollierte Einführung der Tracer in das Mischsystem zu ermöglichen.

Basierend auf den Erkenntnissen und Werten, die aus dem ersten Kalibrierungsversuch gewonnen wurden (dargestellt in Abbildung 4-8), kam man zu dem Entschluss, die Befülldauer für die einzelnen Eimer auf 5 Sekunden zu reduzieren, um genauere Ergebnisse erzielen zu können. Obwohl eine noch kürzere Befülldauer theoretisch die Genauigkeit weiter steigern könnte, erwies sich das aufgrund der Gegebenheiten der Zu- und Abführung als nicht machbar. In Anbetracht des gesamten Zeitrahmens von 130 Sekunden, die vom Ersten bis zum Letzen Tracer vergingen, wurde eine Befülldauer von 5 Sekunden als ausreichend klein erachtet, um aussagekräftige Daten zu generieren. Mit der Anpassung sollte die Qualität der Messergebnisse optimiert werden, ohne die Durchführbarkeit des Versuchs zu beeinträchtigen.

## 4 Experimentelle Untersuchungen

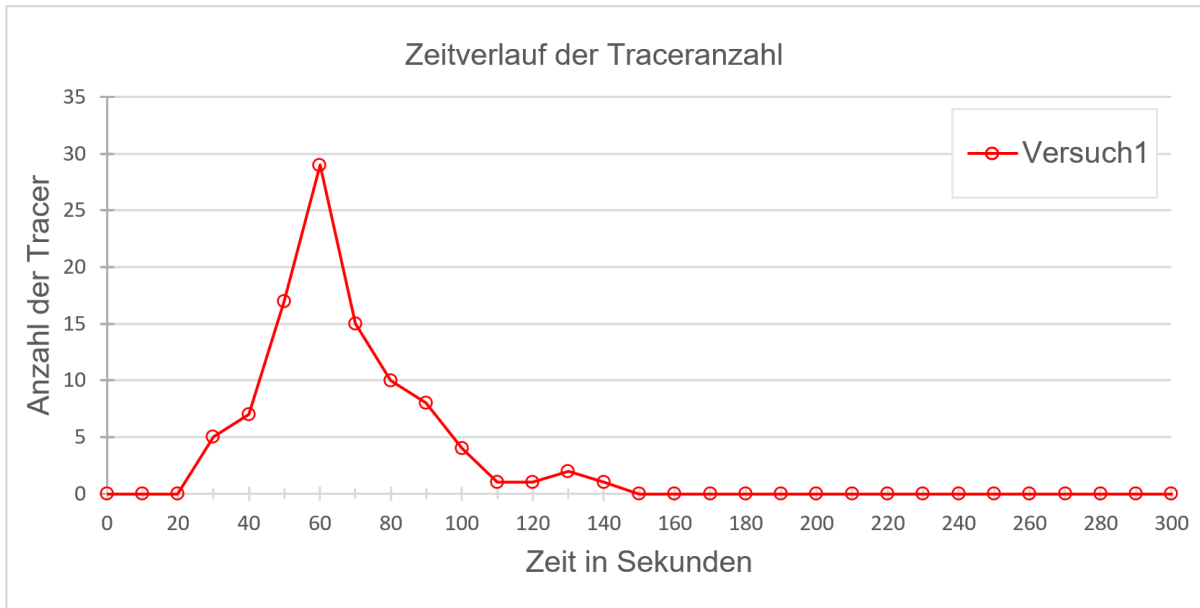


Abbildung 4-8 Ergebnisse des ersten Kalibrierungsversuchs. Gut zu erkennen ist ein ausgeprägter Peak bei 60 Sekunden und das vollständige Verlassen des letzten Tracers aus dem System nach 150 Sekunden.

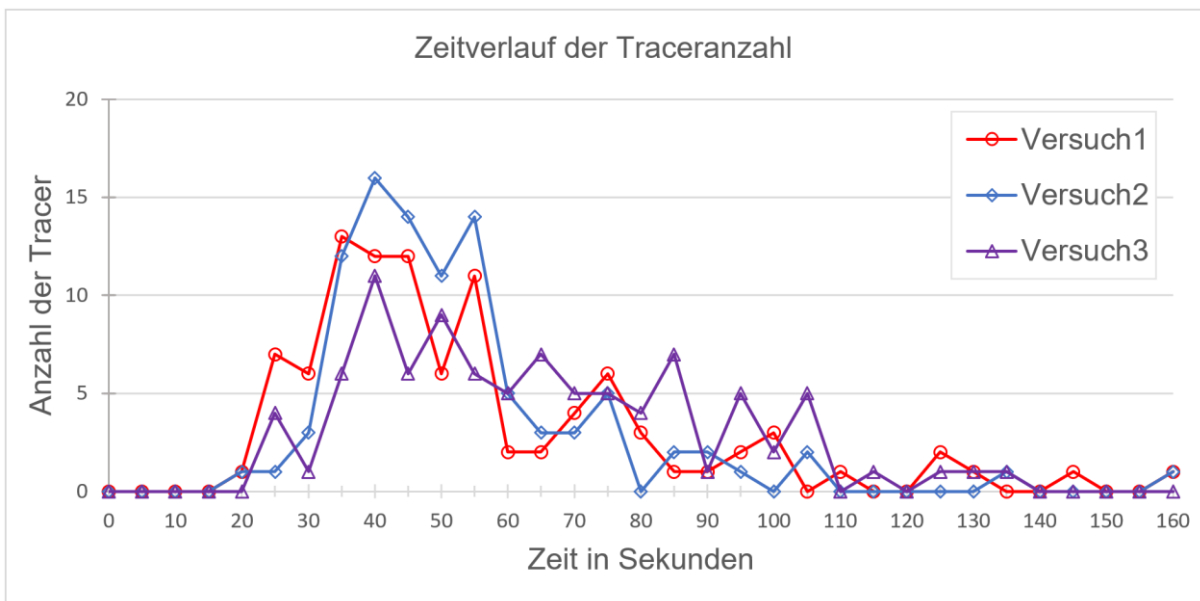


Abbildung 4-9 Ergebnisse des zweiten Kalibrierungsversuchs. Ein eindeutiger Peak ist nicht mehr zu erkennen und auch ein abruptes Ende der Tracerpartikel Ausscheidung ist nicht erkennbar.

Der weniger eindeutige Peak sowie der verlängerte Zeitraum, in dem die Tracerpartikel aus dem System ausgeworfen wurden, zeigten aus den zweiten Kalibrierungsversuchen, dargestellt in Abbildung 4-9, zwei notwendige Anpassungen auf. . Zum einen sollte die Anzahl der Tracerpartikel auf 300 Stück pro Versuch erhöht werden, um einen klareren Verlauf der Verweilzeitverteilung zu gewährleisten. Zum anderen sollte die Anzahl der Eimer auf 39 Stück pro Versuch aufgestockt werden, da der Zeitraum,



## 4 Experimentelle Untersuchungen

---

in dem Tracerpartikel das System verließen, nun nicht mehr adäquat abgedeckt werden konnte.

Ein weiteres Ergebnis des zweiten Kalibrierungsversuchs ist die Entscheidung, pro Versuchstag drei Experimente durchzuführen, sofern die Ergebnisse nicht zu stark voneinander abweichen. Bei signifikanten Differenzen in den Ergebnissen ist geplant, die Anzahl der Durchläufe auf fünf Versuche pro Tag zu erhöhen, um die Konsistenz der Daten bei gleichbleibenden Parametern zu gewährleisten.

Tabelle 4-1 Parameter der durchgeführten Versuche

|                                  |       |       |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Frequenz Pastepump [Hz]          | 38,31 | 38,31 | 38,31 | 38,31 |
| Förderleistung Pastepump [l/min] | 1,8   | 1,8   | 1,8   | 1,8   |
| Drehzahl Mischermotor [1/min]    | 90,44 | 90,44 | 90,44 | 90,44 |
| Gesamtfördermenge [l/min]        | 5,4   | 5,4   | 5,4   | 5,4   |
| Befülldauer je Eimer [s]         | 5     | 5     | 5     | 5     |
| Länge des Mischbereichs [cm]     | 52    | 52    | 38    | 16    |
| Ausbreitmaß Leim [cm]            | 35-38 | >38   | 35-38 | 35-38 |
| Parametersatz [Nr]               | 1     | 2     | 3     | 4     |

Anhand der Erkenntnisse aus den Kalibrierungsversuchen konnten die Versuchsparameter für die nachfolgenden Experimente festgelegt werden (zu sehen in Tabelle 4-1). Die Abbildung 4-10 bis Abbildung 4-13 Abbildung 2-1 veranschaulichen die einzelnen Schritte des Versuchsablaufs, beginnend mit dem Befüllen der Eimer bis hin zum Ausfischen der Tracerpartikel.

## 4 Experimentelle Untersuchungen



Abbildung 4-10 *Frisch befüllte Eimer direkt vor dem Wiegen*



Abbildung 4-11 *Befüllter Eimer beim Wiegen*



Abbildung 4-12 Gewogene und mit Wasser befüllte Eimer



Abbildung 4-13 Ausgefischte Tracerpartikel am Magneten

### 4.3 Datenerfassung und -auswertung

Im Zeitraum zwischen dem 06. Dezember 2023 und dem 21. Februar 2024 fanden im AMC Lab in Achering die Versuche statt. Unser Hauptanliegen war es, die Verweilzeit von Partikeln bei unterschiedlichen Mischlängen zu erforschen. Für die Durchführung



dieser Versuche wurde der experimentelle Aufbau geplant und umgesetzt, wobei jeder Schritt darauf abzielte, exakte und relevante Daten zu sammeln.

Nach der sorgfältigen Vorbereitung des Leims und der Einstellung aller Geräte und Instrumente auf die definierten Parameter, dokumentierten wir wichtige Bedingungen wie das Ausbreitmaß des Leims und des Mörtels. Anhand dieser initialen Datenerfassung konnten wir mögliche Einflüsse auf unsere Messergebnisse identifizieren und kontrollieren. Besonderes Augenmerk legten wir auf die Druckbarkeit des Mörtels vor jeder Messreihe, die sich im Spannungsfeld zwischen zu flüssig und zu fest bewegte. Während der Versuchsreihe wurden alle ungewöhnlichen Beobachtungen oder Abweichungen vom erwarteten Verhalten sorgfältig notiert.

Nach Durchführung der Versuche reinigten wir die genutzten Geräte und Instrumente sorgfältig, damit diese für zukünftige Experimente in einwandfreiem Zustand blieben. Die in dieser Phase gesammelten zusätzlichen Beobachtungen fließen in unsere Analyse ein und eröffnen weitere Perspektiven auf die untersuchten Partikelverweilzeiten.

Nach abgeschlossener Datensammlung begannen wir mit der Auswertung der Ergebnisse. Die vorläufigen Erkenntnisse deuteten auf erste Tendenzen der Partikelverweilzeiten unter verschiedenen Mischbedingungen hin. Eine gründliche und detaillierte Analyse war jedoch unerlässlich, um grundlegendere Schlüsse aus den Daten ziehen zu können. Identifizierte potenzielle Störquellen, wie beispielsweise die Konsistenz des Mörtels, wurden in der Analyse berücksichtigt.

Die umfassende Auswertung unserer Experimente lieferte wertvolle Einsichten in die Dynamik des Mischprozesses. Sie ermöglichte es uns, die Effekte unterschiedlicher Mischlängen auf die Verweilzeit der Partikel zu verstehen und leistete einen wesentlichen Beitrag zur Optimierung der Mischtechnik. Die Kombination aus sorgfältiger Datenerfassung und methodischer Datenauswertung hat somit unser Verständnis in diesem spezifischen Bereich erheblich erweitert und bildet eine solide Grundlage für zukünftige Forschungsarbeiten.

### **4.4 Ergebnisse**

In den Abbildung 4-14 bis Abbildung 4-20 werden die aus den RTD-Experimenten extrahierten Rohdaten dargestellt, während die Abbildung 4-22 und Abbildung 4-23 die ermittelten Mittelwerte für die verschiedenen Parametersätze aufzeigen.



In Abbildung 4-21 kann man eine Besonderheit sehen, die auf eine unzureichende Mischenergie zurückgeführt werden kann, denn hier zeigt das Poraver noch seine ursprüngliche weiße Farbe. Deshalb wurde beschlossen, dass mit dem Parametersatz 4 nur ein einziger Versuchstag mit drei Versuchen stattfinden sollte. Eine ähnliche Entscheidung traf man für den Parametersatz 2. Hier war Druckbarkeit des Materials nicht gegeben, weshalb ebenfalls nur ein Versuchstag mit drei Experimenten durchgeführt wurde. Auffallend ist dabei, insbesondere in Abbildung 4-16, dass der Mörtel im ersten Versuch sehr dicht am druckbaren Bereich war, weshalb diese Kurve eine stärkere Ähnlichkeit mit den Ergebnissen aus Parametersatz Nr. 1 aufweist.

In fast allen Versuchen gab es eine interessante Übereinstimmung. Nach dem ersten Abfall der Kurven und variierenden Zeitspannen, in denen keine Tracerpartikel ausgetreten waren, verließen wieder einzelne Tracer das System. Außerdem war es nicht in jedem Versuch möglich, die gesamte Menge der verwendeten 300 Tracerpartikel wiederzugewinnen. Die Anzahl der tatsächlich wiedergefundenen Tracer variierte. In zwei Versuchen wurden 296, in drei Versuchen 297, in vier Versuchen 298, in zwei weiteren Versuchen 299 und in sieben Versuchen wurden alle 300 Tracer wiedergefunden. Einzig bei den Versuchen mit Parametersatz Nr. 2 (Abbildung 4-16), bei denen der Mörtel eine zu flüssige Konsistenz aufwies, konnten in allen drei Durchführungen jeweils alle 300 Tracerpartikel wiedergefunden werden.

Zur Ermittlung der Standardabweichung, den Auswaschzeiten und sonstigen Berechnungen wurde stets der Zeitpunkt genutzt, an dem 97 % aller Tracerpartikel das System verlassen hatten. Diese Wahl basiert darauf, dass die Verlaufskurven zu diesem Zeitpunkt erstmals eine Bewegung hin zu null zeigen, was darauf hinweist, dass der überwiegende Teil der Tracer das System verlassen hat. Nach diesem Zeitpunkt kommt es lediglich noch zu sporadischen, einzelnen Traceraustritten, die nicht mehr repräsentativ für die Hauptverweilzeitverteilung sind.

4.4.1 Parametersatz Nr. 1

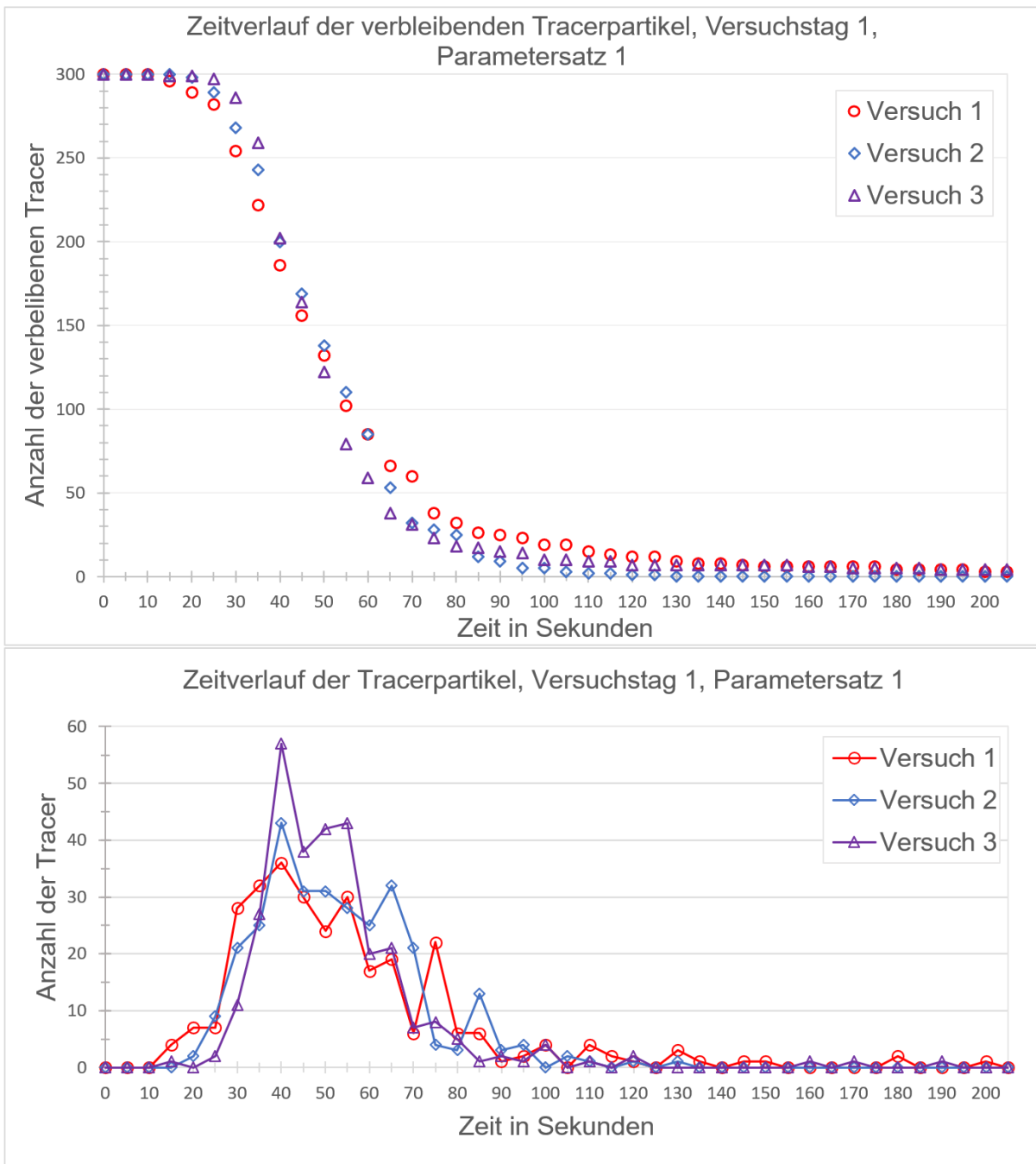


Abbildung 4-14 Ergebnisse des ersten Versuchstages mit dem in Tabelle 4-1 beschriebenen Parametersatz Nr. 1. In der oberen Hälfte ist die im System verbleibende Anzahl an Tracern über die Zeit zu sehen. In der unteren Hälfte kann man die über die Zeit ausgewaschenen Tracer sehen.

Abbildung 4-14 zeigt schön nah beieinander liegende Verläufe über alle drei Versuche. Auffallend ist der etwas größere Peak in Versuch 3 und vereinzelt über den gesamten Messzeitraum austretende Tracerpartikel. In Abbildung 4-15 weicht der Versuch 2 auffallend von den beiden anderen ab. Der Zeitraum in dem Tracer austreten ist etwas kürzer als in Abbildung 4-14. Für Abbildung 4-14 beträgt die Auswaschzeit der Tracer

## 4 Experimentelle Untersuchungen

110 Sekunden mit einer Standardabweichung von 16,3 Sekunden. Für Abbildung 4-15 beträgt die Auswaschzeit 115 Sekunden und die Standardabweichung liegt bei 24,2 Sekunden.

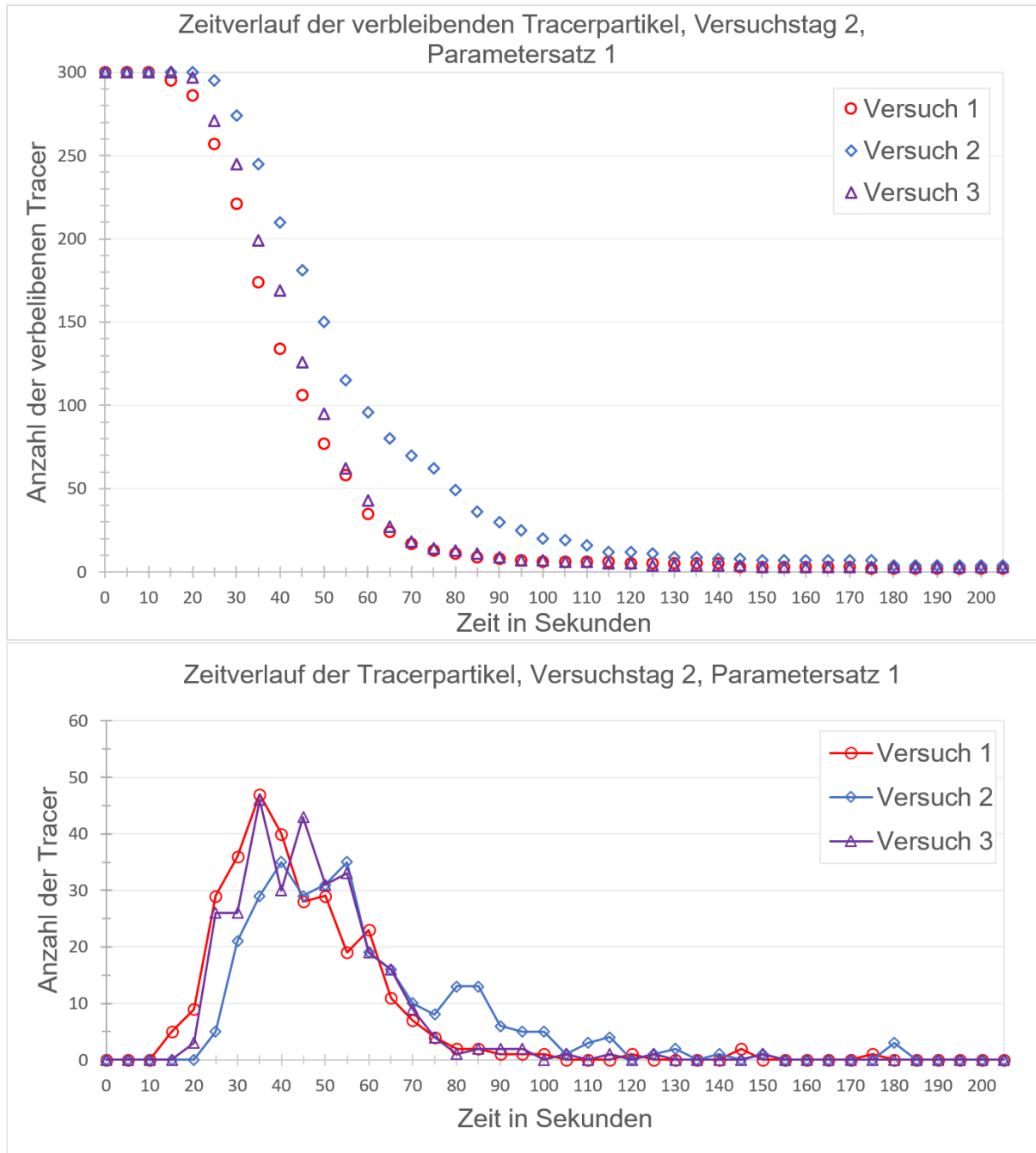


Abbildung 4-15 Ergebnisse des zweiten Versuchstages mit dem in Tabelle 4-1 beschriebenen Parametersatz Nr. 1. In der oberen Hälfte ist die im System verbleibende Anzahl an Tracern über die Zeit zu sehen. In der unteren Hälfte kann man die über die Zeit ausgewaschenen Tracer sehen.

4.4.2 Parametersatz Nr. 2

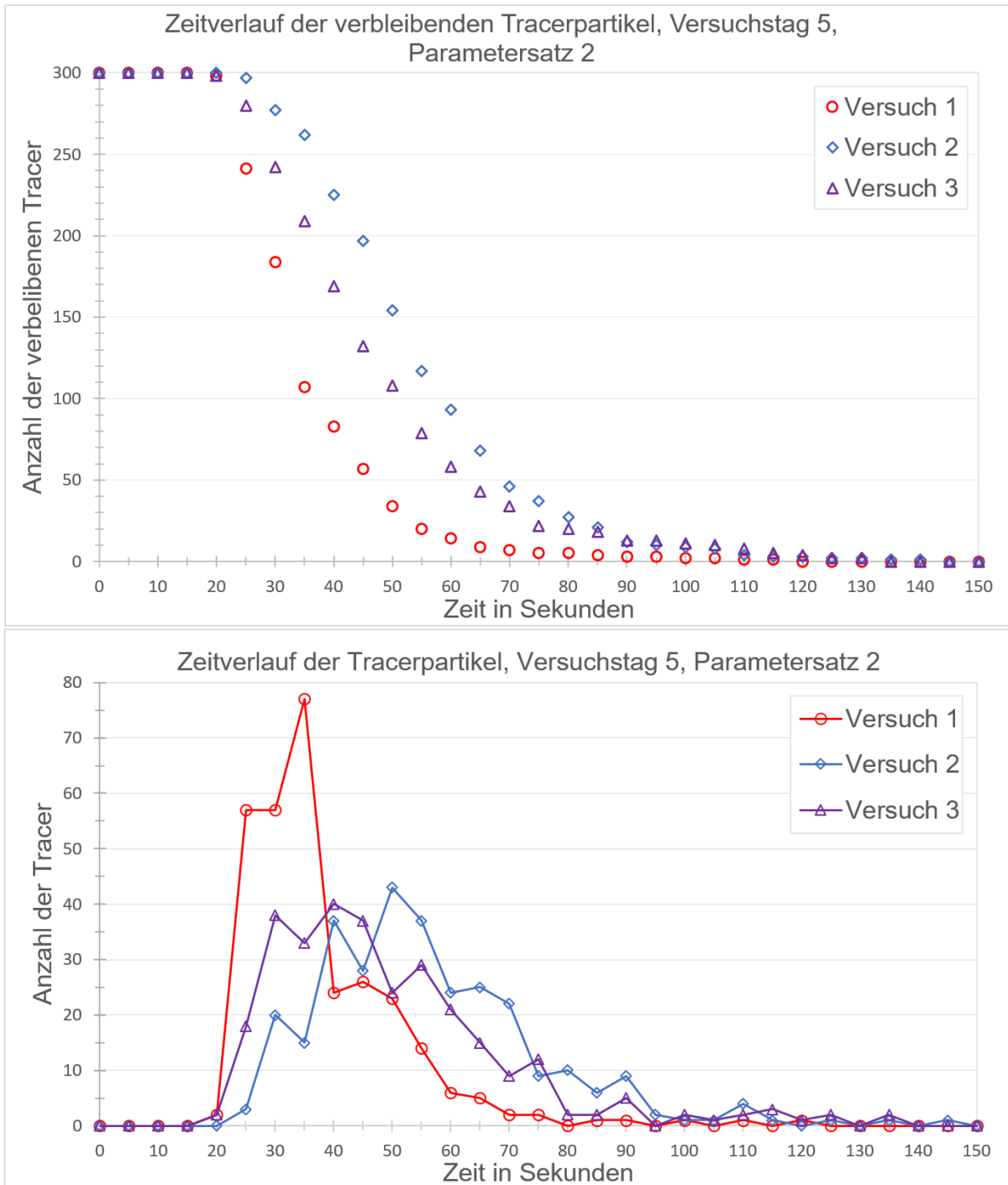


Abbildung 4-16 Ergebnisse des fünften Versuchstages mit dem in Tabelle 4-1 beschriebenen Parametersatz Nr. 2. In der oberen Hälfte ist die im System verbleibende Anzahl an Tracern über die Zeit zu sehen. In der unteren Hälfte kann man die über die Zeit ausgewaschenen Tracer sehen.

In Abbildung 4-16 fällt auf, dass die Kurvenverläufe nicht so dicht beieinanderliegen wie in den anderen Experimenten. Sehr auffallend ist der ausgeprägte Peak im ersten Versuch, bei dem das Material eine Konsistenz aufwies, die sehr nahe am optimal druckbaren Bereich lag. Der Zeitraum über den sporadisch noch Tracer austreten ist zudem deutlich kürzer als im Vergleichbaren Parametersatz Nr. 1. Die durchschnittliche Auswaschzeit für diesen Parametersatz lag bei 110 Sekunden, wobei eine Standardabweichung von 19,6 Sekunden gemessen wurde.

### 4.4.3 Parametersatz Nr. 3

Abbildung 4-17 zeigt durchweg sehr ähnliche Kurvenverläufe über alle drei durchgeführten Versuche. Hier fällt auf, dass der Peak im dritten Versuch bereits ein Befüllintervall früher auftritt, als in den beiden anderen Experimenten. Zudem ist im zweiten Versuch ein markantes Intervall zwischen 65 und 105 Sekunden erkennbar, in dem keine Tracerpartikel ausgewaschen wurden, gefolgt von einem plötzlichen Austritt von 5 Tracern bei 125 Sekunden. Da jedoch bereits bei 60 Sekunden 97 % aller Tracer das System verlassen hatten, hatte diese spätere Tracerfreisetzung keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Auswertung. Die durchschnittliche Auswaschzeit in diesen Experimenten lag bei 45 Sekunden, mit einer Standardabweichung von 10,8 Sekunden.

Die in Abbildung 4-18 dargestellten Ergebnisse zeigen ebenfalls recht homogene Kurvenverläufe. Auffallend ist ein ausgeprägter Peak mit 160 Tracern im dritten Versuch sowie eine anfänglich etwas langsamer abfallende Kurve im ersten Versuch. Die Marke von 97 % der Tracer in diesem Versuch wurde deutlich später erreicht als in den beiden anderen Versuchen. Die durchschnittliche Auswaschzeit in diesen Experimenten liegt bei 55 Sekunden, während die Standardabweichung 29 Sekunden beträgt.

## 4 Experimentelle Untersuchungen

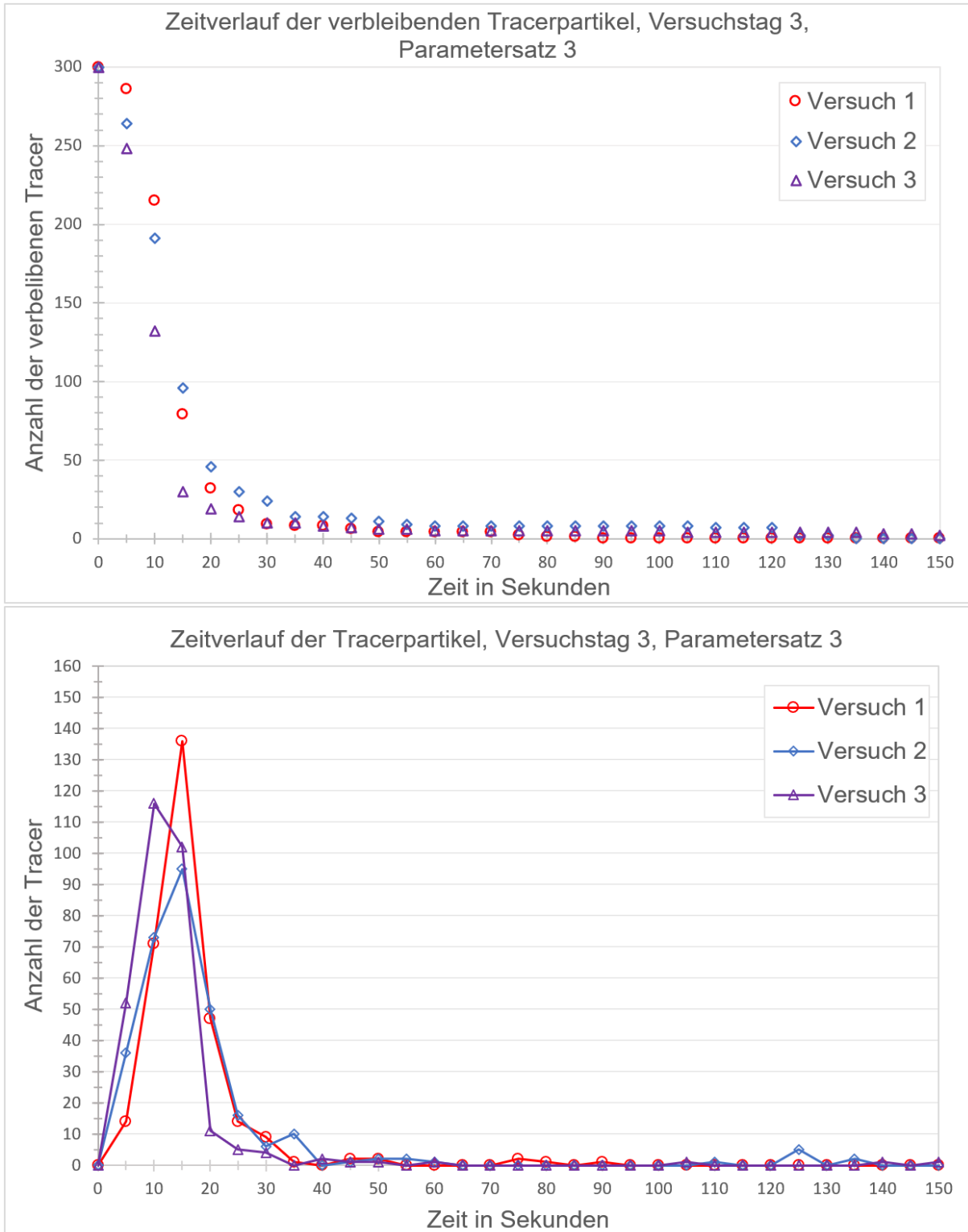


Abbildung 4-17 Ergebnisse des dritten Versuchstages mit dem in Tabelle 4-1 beschriebenen Parametersatz Nr. 3. In der oberen Hälfte ist die im System verbleibende Anzahl an Tracern über die Zeit zu sehen. In der unteren Hälfte kann man die über die Zeit ausgewaschenen Tracer sehen.

## 4 Experimentelle Untersuchungen

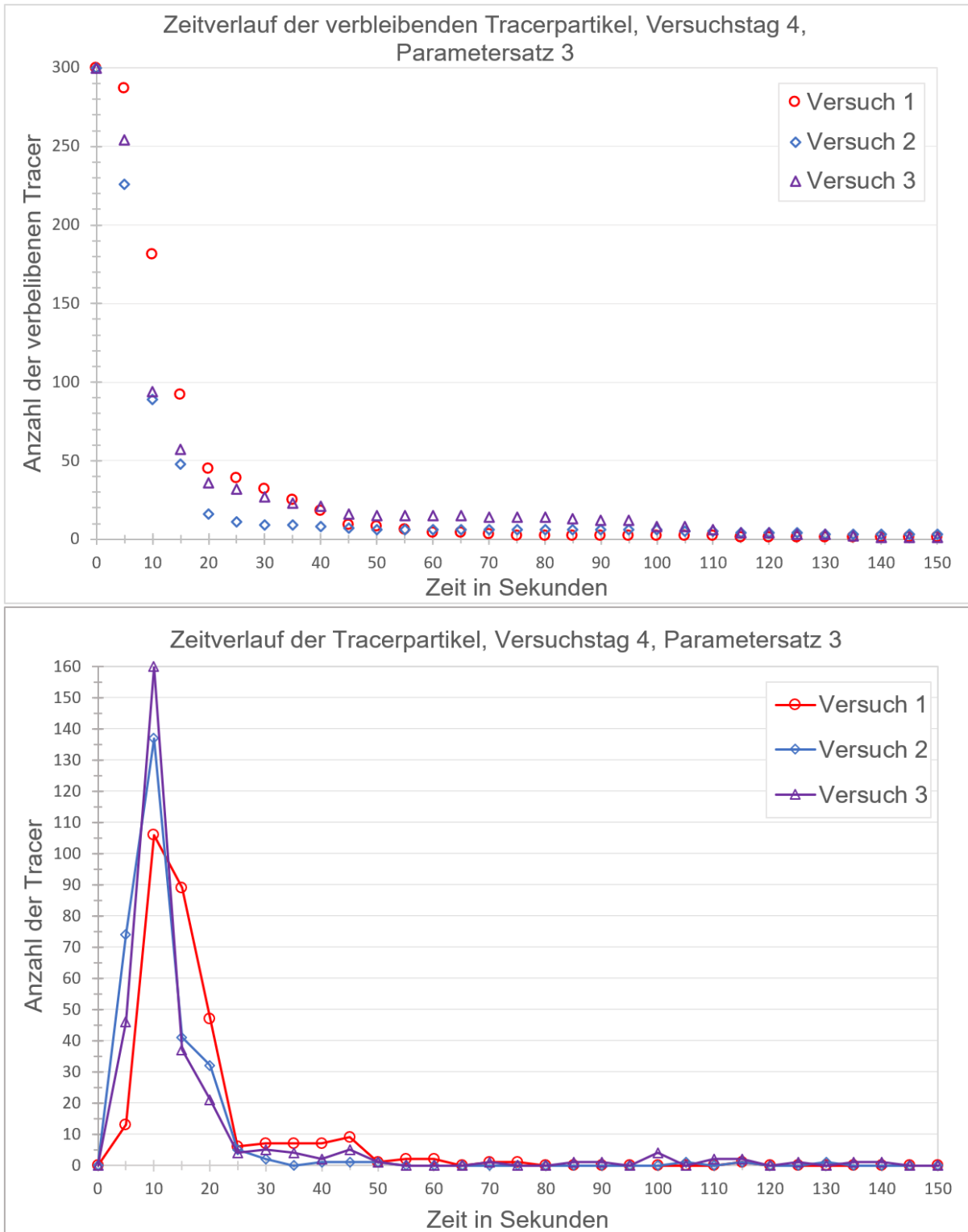


Abbildung 4-18 Ergebnisse des vierten Versuchstages mit dem in Tabelle 4-1 beschriebenen Parametersatz Nr. 3. In der oberen Hälfte ist die im System verbleibende Anzahl an Tracern über die Zeit zu sehen. In der unteren Hälfte kann man die über die Zeit ausgewaschenen Tracer sehen.

#### 4.4.4 Parametersatz Nr. 4

In den Abbildung 4-19 und Abbildung 4-20 ist ein etwas höherer Peak im dritten Versuch zu erkennen. Abgesehen davon weisen die Kurven eine starke Ähnlichkeit auf. Die durchschnittliche Auswaschzeit für diesen Parametersatz liegt bei 25 Sekunde mit einer Standardabweichung von 4,1 Sekunden.

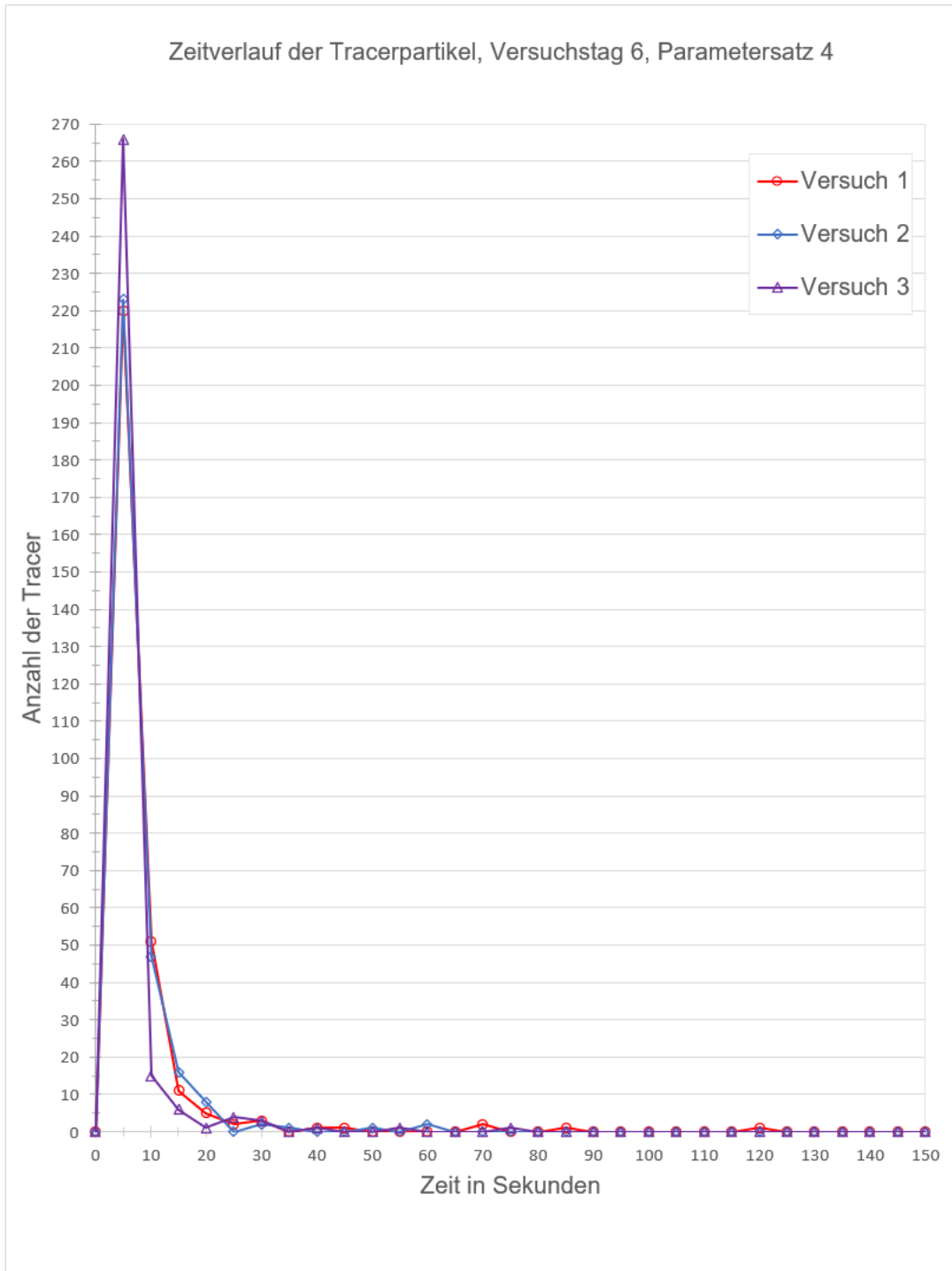


Abbildung 4-19 Ergebnisse des sechsten Versuchstages mit den in Tabelle 4-1 beschriebenen Parametersatz Nr. 4. Zu sehen sind die über die Zeit ausgewaschenen Tracer



## 4 Experimentelle Untersuchungen

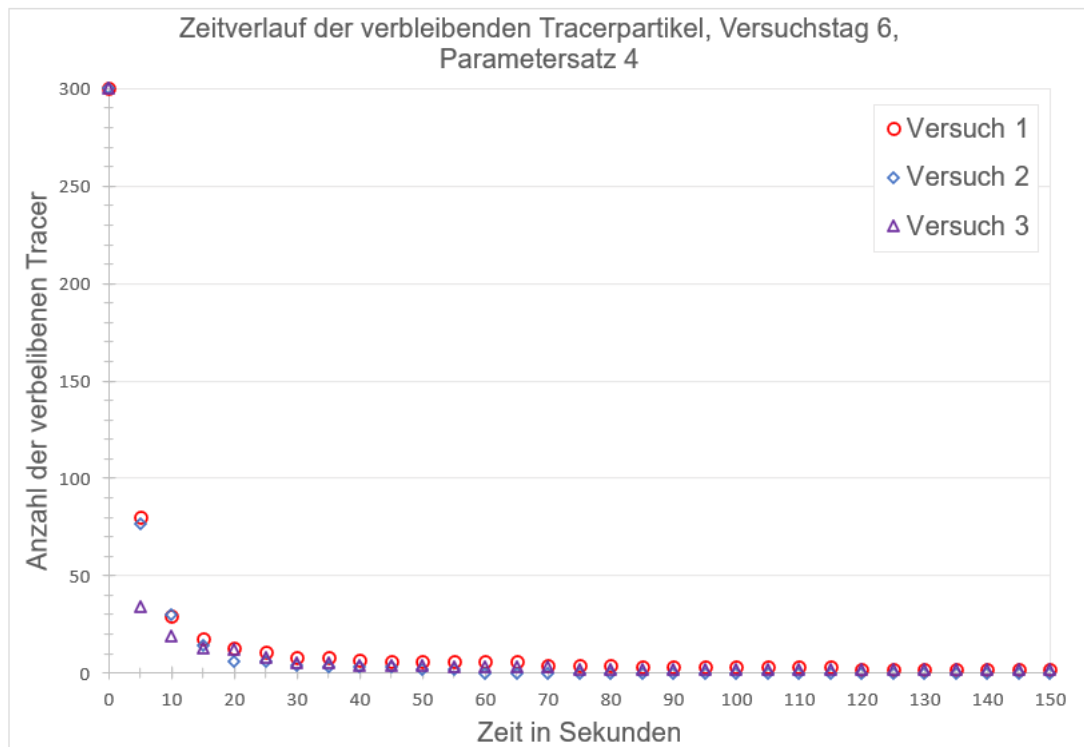


Abbildung 4-20 Ergebnisse des sechsten Versuchstages mit den in Tabelle 4-1 beschriebenen Parametersatz Nr. 4. Zu sehen sind die im System verbleibenden Tracer über die Zeit.



Abbildung 4-21 Mörtel aus dem Mischbereich mit dem in Tabelle 4-1 beschriebenen Parametersatz Nr. 4. Deutlich zu erkennen an dem noch Weißen Poraver ist die zu geringe Mischenergie.

### 4.4.5 Vergleich aller Parametersätze

In den Abbildung 4-22 und Abbildung 4-23 sieht man, dass sich die Kurvenverläufe der Parametersätze Nr. 1 und Nr. 2 sehr ähneln. Es zeigt sich zudem ein erkennbarer Zusammenhang zwischen der Länge des Mischers und der Höhe des Peaks in Abbildung 4-23 sowie zwischen der Mischerlänge und dem steilen Abfall der Kurve in Abbildung 4-22.

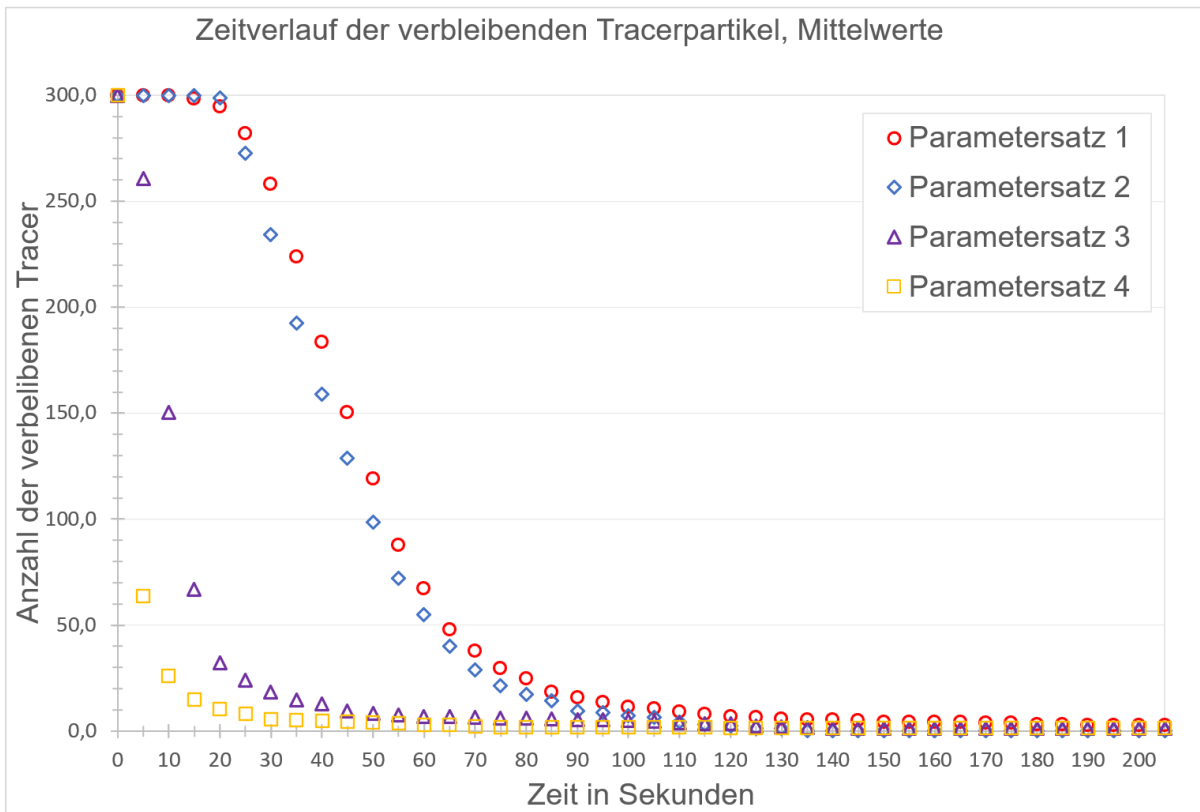


Abbildung 4-22 Mittelwerte der einzelnen Parametersätze. Zu sehen ist die im System verbleibende Anzahl an Tracern über die Zeit.

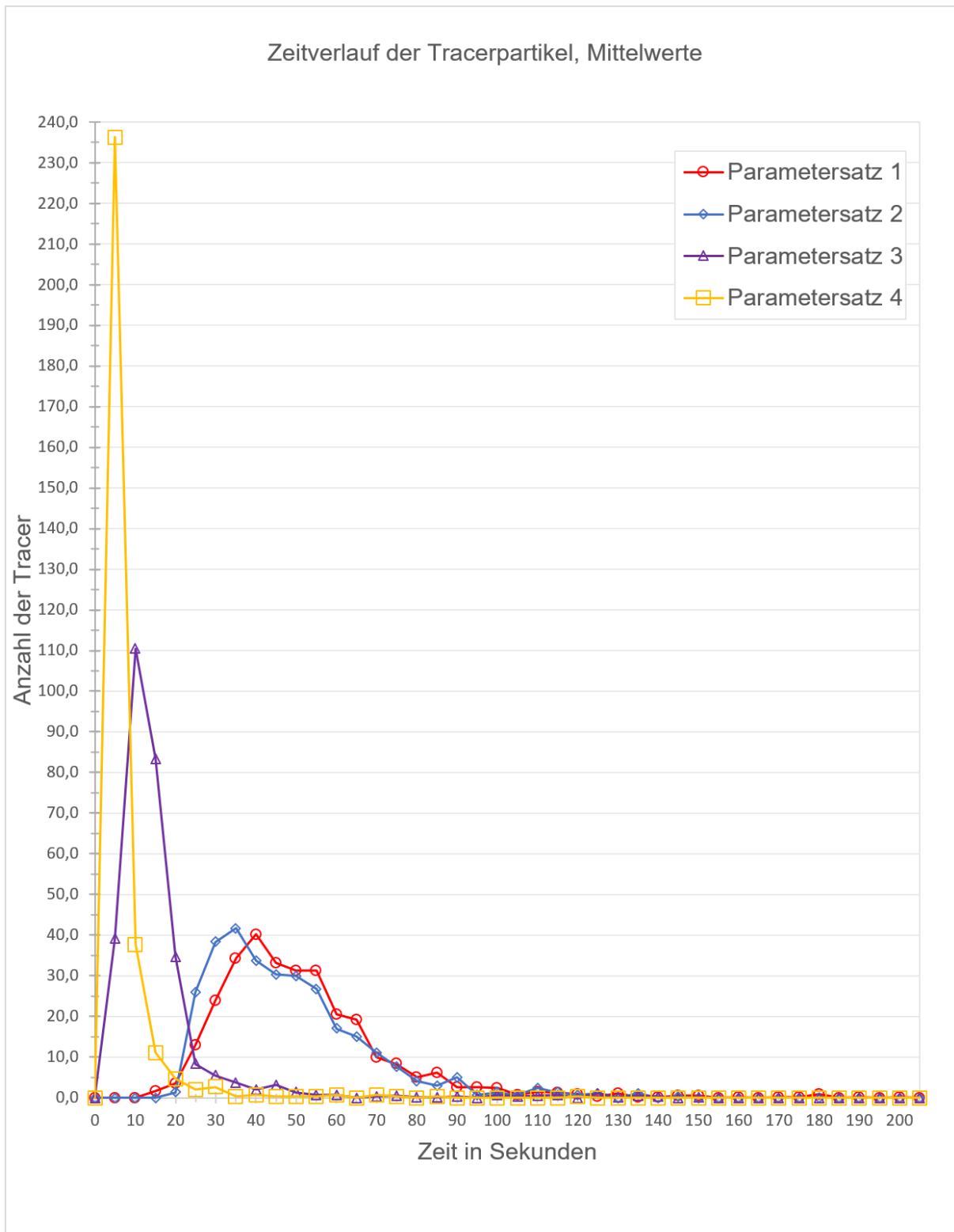


Abbildung 4-23 Mittelwerte der einzelnen Parametersätze. Man kann sehen wie die Tracer im Laufe der Zeit aus dem System ausgewaschen wurden.



## 5 Auswertung der Ergebnisse und Diskussion

---

Während der Versuche zur Bestimmung der RTD in einem Near-Nozzle-Mixing Prozesses traten besonderes bei der stoßweisen Zugabe der Tracerpartikel einige Herausforderungen auf. In manchen Fällen gelang es nicht, alle Tracer mit dem ersten Stoß vollständig zu entleeren. Mögliche Gründe hierfür könnten sein, dass die Mischwelle während der Tracerzugabe das Zuführrohr blockierte, oder dass die Tracer aufgrund zu hohen Drucks im Rohr verklemmten und sich erst bei weiteren Stößen lösten. Dadurch dehnte sich der Zeitraum der Tracerzugabe in manchen Fällen auf bis zu einer Sekunde aus, was theoretisch den Beginn, ab dem Tracer ausgewaschen wurden, um ein Befüllintervall von 5 Sekunden verschieben könnte. Angesichts der längeren Zeiträume, über die Tracer ausgewaschen wurden, sollte dies allerdings nur einen marginalen Einfluss auf die Ergebnisse haben.

Eine weitere nicht zu vernachlässigende Herausforderung stellte die permanente Schwankung der Materialkonsistenz dar. Während des laufenden Betriebs kam es vor, dass sich die Konsistenz des Materials, ohne jegliche Anpassung der Parameter, von einem druckbaren Zustand hin zu einem zu flüssigen oder auch in das Gegenteil, zu einem zu festen Zustand änderte. Zwar wurde die Druckbarkeit des Materials vor jedem Versuch überprüft, jedoch waren Änderungen der Konsistenz während des laufenden Versuchs nicht vorhersehbar und konnten somit nicht korrigiert werden. Diese Schwankungen könnten einen erheblichen Einfluss auf die Materialqualität sowie auf die gesamte Dauer haben, in der die Tracerpartikel aus dem System ausgewaschen werden. Vor der Durchführung weiterer RTD-Versuche wäre es daher ratsam, zunächst Maßnahmen zu ergreifen, um die Konsistenz und somit die Stabilität der Druckbarkeit der Mörtelmischung deutlich zu verbessern.

Für den Zeitpunkt, zu dem 97 % aller Tracer das System verlassen hatten, wurde für Parametersatz Nr. 1 eine Standardabweichung von 19,3 Sekunden festgestellt. Der Parametersatz Nr. 2 wies eine Standardabweichung von 19,6 Sekunden auf. Bei Parametersatz Nr. 3 musste der dritte Versuch am vierten Versuchstag, wie in Abbildung 4-18 dargestellt, aufgrund großer Abweichungen als Ausreißer ausgeschlossen werden. Nach Eliminierung dieses Ausreißers resultierte eine Standardabweichung von 10,7 Sekunden für die verbleibenden Versuche. Beim Parametersatz Nr. 4 konnte eine deutlich niedrigere Standardabweichung von 4,1 Sekunden ermittelt werden. Wie zu erwarten war, bedeutet ein kürzerer Mischbereich also eine kürzere Standardabweichung.

Aus den Ergebnissen der Parametersätze Nr. 1 und Nr. 2 lässt sich ableiten, dass die Druckbarkeit des Materials wahrscheinlich nur einen minimalen Einfluss auf die Auswaschzeit und Standartabweichung hat. Eine fundierte Bewertung dieser Standardabweichungswerte erfordert jedoch einen detaillierten Vergleich mit den Forschungsarbeiten von Han Li und Mathias Grünwald, die in ihren Studien unter anderem die Materialqualität des in diesen Versuchen gewonnenen Materials beurteilen.

Ein weiterer interessanter Aspekt ist das Fehlen eines direkten linearen Zusammenhangs zwischen Mischerlänge und RTD/Standartabweichung. So wurden beispielsweise bei einer Mischerlänge von 16 cm 97 % aller Tracer nach 25 Sekunden ausgewaschen, während bei einer Länge von 38 cm dafür 50 Sekunden und bei 52 cm sogar 110 Sekunden benötigt wurden. Das könnte unter anderem daran liegen, dass sich die Geometrie der Mischerwelle (siehe Abbildung 3-4) nach ca. ein Drittel ändert und sich dadurch auch das Strömungsfeld verändert. Zukünftige Untersuchungen sollten daher eine breitere Palette an Mischlängen berücksichtigen, die innerhalb derselben Mischwellengeometrie liegen.

Sporadische Tracer Austritte nach dem Abklingen der Verlaufskurven können mit der hohen Adhäsion des Materials zusammenhängen. So könnte es zum Beispiel passieren, dass etwas Material mit Tracerpartikeln an der Mischwelle anhaftet und sich erst nach einigen Umdrehungen wieder löst und im weiteren Mischprozess wieder aufgenommen wird. Diese Hypothese wird durch den Parametersatz Nr. 2 gestärkt, bei dem der Mörtel zu flüssig und somit weniger adhäsiv war, was den Zeitraum verkürzte, in dem Tracer ausgewaschen wurden. Nicht auszuschließen ist aber auch die Möglichkeit, dass Toträume in der Mischgeometrie dafür verantwortlich sind

Dass nicht alle Tracer in jedem Versuch gefunden wurden, könnte an kleinen Mengen Mörtel liegen, die bei Eimerwechseln verloren gingen, oder an Toträumen innerhalb der Mischgeometrie. Da sich die Verluste jedoch auf maximal 1,3 % der gesamten Tracer beschränkten, ist davon auszugehen, dass dies die Genauigkeit der Ergebnisse nicht groß beeinträchtigt. Ein direkter Zusammenhang zwischen der Anzahl der maximal ausgefischten Tracer und der Mischlänge lässt sich nicht erkennen.

## 6 Zusammenfassung

---

In der vorliegenden Semesterarbeit wurde die Verweilzeitverteilung (RTD) innerhalb eines Near-Nozzle-Mixing-Prozesses in der 3D-Betonextrusion untersucht, wobei der Fokus auf verschiedenen Längen des Mischbereichs lag. Die erzielten Ergebnisse wurden detailliert vorgestellt und analysiert. Um eine solche Untersuchung durchführen zu können, war es zunächst notwendig, einen für den Einsatz im Mörtel geeigneten Tracer zu identifizieren. Zur Auswahl standen fluoreszierende Tracer, magnetisch empfindliche Tracer sowie die eine Leitwertmessung.

Nach sorgfältiger Bewertung der verschiedenen Methoden fiel die Entscheidung auf magnetisch empfindliche Tracer, die sich als besonders kompatibel mit dem Mörtel herausstellten. Auf Basis dieser Entscheidung wurde ein experimentelles Verfahren zur Bestimmung der RTD konzipiert, das eine manuelle Zugabe und Erfassung der Tracer erforderte. Nach den anfänglichen Kalibrierungsversuchen musste das System zur Tracerzuführung angepasst werden. Um den Rahmen der Arbeit nicht zu sprengen, wurde die Variation der Parameter auf drei unterschiedliche Mischlängen begrenzt. In der Studie wurden insgesamt 24 Experimente mit verschiedenen Parametersätzen realisiert. Von diesen 24 durchgeführten Versuchen wurden 18 für die vorliegende Auswertung berücksichtigt.

Für die Analyse wurden insbesondere die Ausscheidungsverläufe der Tracer, die im System verbleibenden Tracer und der Zeitpunkt, zu dem 97 % aller Tracer das System verlassen hatten, berücksichtigt. Aus diesen Daten ließen sich Korrelationen zwischen den gewählten Parametern und der RTD ableiten. Obwohl die gesammelten Informationen wertvolle Einblicke gewähren, reichen sie derzeit noch nicht aus, um ein mathematisches Modell der RTD für dieses spezifische System zu formulieren. Es wird deutlich, dass weitere Experimente mit einer breiteren Palette an Parametern notwendig sind, um ein valides Modell entwickeln zu können. Die Arbeit legt somit den Grundstein für zukünftige Forschungen in diesem Bereich und unterstreicht die Notwendigkeit weiterführender experimenteller Untersuchungen.





## 7 Ausblick

---

In dieser Semesterarbeit gelang die Entwicklung eines experimentellen Verfahrens zur Bestimmung der RTD im Rahmen eines Near-Nozzle-Mixing-Prozesses bei der 3D-Beton-Extrusion. Trotz des Erfolgs weist das Verfahren an einigen Stellen noch Verbesserungsbedarf auf. Ein wesentliches Problem stellte beispielsweise die permanente Schwankung der Mörtelkonsistenz dar, wodurch es schwierig war während der Versuche ein durchgehend druckbares Material zu gewährleisten. Obwohl sich herausstellte, dass der Einfluss der Mörtelkonsistenz allein nicht übermäßig groß ist, können viele kleine Faktoren in ihrer Gesamtheit doch erheblichen Einfluss auf den Druckprozess ausüben. Daher wäre es ratsam, vor der Durchführung weiterer RTD-Experimente diese Schwankungen so weit wie möglich zu reduzieren.

Es ist zudem sinnvoll die Ergebnisse mit den Arbeiten von Han Li und Mathias Grünwald abzugleichen, um die Materialqualität bei unterschiedlichen Mischlängen bewerten zu können. Nur durch einen solchen Vergleich lässt sich einschätzen, in welchem Gütebereich sich die beobachteten Standardabweichungen bewegen.

Obwohl aus den bisher gesammelten Daten erste Schlüsse über den Zusammenhang zwischen Mischerlänge und RTD gezogen werden können, reichen diese noch nicht aus, um gültige Aussagen zu treffen. Es wird empfohlen, zusätzliche RTD-Experimente mit variierenden Parametern durchzuführen, um eine umfassendere Datenbasis zu erhalten. Vor allem der Einfluss von Änderungen in der Mischergeometrie auf die RTD sollte besonders berücksichtigt werden.

In einem nächsten Schritt sollte ein automatisiertes Verfahren für die Bestimmung der RTD entwickelt werden. Dadurch wäre es möglich, eine deutlich größere Anzahl an Versuchen in wesentlich kürzerer Zeit durchzuführen. Das würde nicht nur die Datensammlung erheblich vereinfachen, sondern auch ein umfangreicheres Datenset für die Auswertung bereitstellen.



## Literaturverzeichnis

---

- [A.T-2002] A.T. Harris, J.F. Davidson, R.B. Thorpe: A novel method for measuring the residence time distribution in short time scale particulate systems. In: Chemical Engineering Journal, Jg. 2002 (2002) Nr. 89, S. 127–142.
- [Agu-2017] Agustí-Juan, I.; Müller, F.; Hack, N.; Wangler, T.; Habert, G.: Potential benefits of digital fabrication for complex structures: Environmental assessment of a robotically fabricated concrete wall. In: Journal of Cleaner Production, Jg. 154 (2017), S. 330–340.
- [Ant-2021] Anton, A.; Reiter, L.; Wangler, T.; Frangez, V.; Flatt, R. J.; Dillenburger, B.: A 3D concrete printing prefabrication platform for bespoke columns. In: Automation in Construction, Jg. 122 (2021), S. 103467.
- [Bar-2017] Barbosa, F.; Woetzel, J.; Mischke, J.; Ribeirinho, M.; Sridhar, M.; Parsons, M.; Bertram, N.; Brown, S.: Reinventing construction: A route of higher productivity, 2017.
- [Bos-2022] Bos, F. P.; Menna, C.; Pradena, M.; Kreiger, E.; Da Silva, W. L.; Rehman, A. U.; Weger, D.; Wolfs, R.; Zhang, Y.; Ferrara, L.; Mechtcherine, V.: The realities of additively manufactured concrete structures in practice. In: Cement and Concrete Research, Jg. 156 (2022), S. 106746.
- [Bre-1980] Brewster, B. S.; Seader, J. D.: Nonradioactive tagging method of measuring particle velocity in pneumatic transport. In: AIChE Journal, Jg. 26 (1980) Nr. 2, S. 325–327.
- [Bus-2020] Buswell, R. A.; Da Silva, W. L.; Bos, F. P.; Schipper, H. R.; Lowke, D.; Hack, N.; Kloft, H.; Mechtcherine, V.; Wangler, T.; Roussel, N.: A process classification framework for defining and describing Digital Fabrication with Concrete. In: Cement and Concrete Research, Jg. 134 (2020), S. 106068.
- [CHO-1998] CHOUDHURY, G. S.; GAUTAM, A.: On-line Measurement of Residence Time Distribution in a Food Extruder. In: Journal of Food Science, Jg. 63 (1998) Nr. 3, S. 529–534.

- [Dan-1995] Danckwerts, P. V.: Continuous flow systems. Distribution of residence times. In: Chemical Engineering Science, Jg. 50 (1995) Nr. 24, S. 3857–3866.
- [Dau-2008] Daumann, B.; Nirschl, H.: Feststoffmischen im diskontinuierlichen Mischbetrieb. In: Schüttgut, Jg. 2008 (2008) Nr. 3, S. 172–181.
- [Dav-2023] David Zajonz: Wie die Zementindustrie ihr Klima-Problem lösen will. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/energie/zement-industrie-energieverbrauch-klimaschutz-100.html>, Aufruf am 02.01.2023.
- [Dic-1989] Dickens, A. W.; Mackley, M. R.; Williams, H. R.: Experimental residence time distribution measurements for unsteady flow in baffled tubes. In: Chemical Engineering Science, Jg. 44 (1989) Nr. 7, S. 1471–1479.
- [Edw-2023] Edward Wakefield: Dar Al Arkan 3D prints three-story villa in Riyadh, Saudi Arabia. <https://www.voxelmatters.com/dar-al-arkan-3d-prints-three-story-villa-in-riyadh-saudi-arabia/>, Aufruf am 13.01.2024.
- [Gao-2012] Gao, Y.; Muzzio, F. J.; Ierapetritou, M. G.: A review of the Residence Time Distribution (RTD) applications in solid unit operations. In: Powder Technology, Jg. 228 (2012), S. 416–423.
- [Gib-2015] Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B.: Additive Manufacturing Technologies. Springer New York, New York, NY, 2015.
- [Hu-1999] Hu, G.-H.; Kadri, I.; Picot, C.: One-line measurement of the residence time distribution in screw extruders. In: Polymer Engineering and Science, Jg. 39 (1999) Nr. 5, S. 930–939.
- [Kha-2020] Khan, M. S.; Sanchez, F.; Zhou, H.: 3-D printing of concrete: Beyond horizons. In: Cement and Concrete Research, Jg. 133 (2020), S. 106070.
- [Kho-2001] Khoshnevis, B.; Bukkapatnam, S.; Kwon, H.; Saito, J.: Experimental investigation of contour crafting using ceramics materials. In: Rapid Prototyping Journal, Jg. 7 (2001) Nr. 1, S. 32–42.
- [Kho-2006] Khoshnevis, B.; Hwang, D.; Yao, K. T.; Yeh, Z.: Mega-scale fabrication by Contour Crafting. In: International Journal of Industrial and Systems Engineering, Jg. 1 (2006) Nr. 3, S. 301.

- [Kol-2005] Kolarevic, B. (Hrsg.): Architecture in the digital age – Design and manufacturing. Taylor & Francis, New York, 2005.
- [Lev-1999] Levenspiel, O.: Chemical reaction engineering. Wiley, New York, Weinheim, 1999.
- [Lim-2012] Lim, S.; Buswell, R. A.; Le, T. T.; Austin, S. A.; Gibb, A.; Thorpe, T.: Developments in construction-scale additive manufacturing processes. In: Automation in Construction, Jg. 21 (2012), S. 262–268.
- [Lip-2012] Lipson, H.: Fabricated – The New World of 3D Printing. John Wiley & Sons Incorporated, Somerset, 2012.
- [Mec-2018] Mechtcherine, V.; Grafe, J.; Nerella, V. N.; Spaniol, E.; Hertel, M.; Füssel, U.: 3D-printed steel reinforcement for digital concrete construction – Manufacture, mechanical properties and bond behaviour. In: Construction and Building Materials, Jg. 179 (2018), S. 125–137.
- [Mec-2019] Mechtcherine, V.; Nerella, V. N.; Will, F.; Näther, M.; Otto, J.; Krause, M.: Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing. In: Automation in Construction, Jg. 107 (2019), S. 102933.
- [Mec-2020] Mechtcherine, V.; Khayat, K.; Secrieru, E.: Rheology and Processing of Construction Materials. Springer International Publishing, Cham, 2020.
- [Men-2006] Menges, A.: Manufacturing diversity. In: Architectural Design, Jg. 76 (2006) Nr. 2, S. 70–77.
- [Nau-2008] Nauman, E. B.: Residence Time Theory. In: Industrial & Engineering Chemistry Research, Jg. 47 (2008) Nr. 10, S. 3752–3766.
- [Ngo-2018] Ngo, T. D.; Kashani, A.; Imbalzano, G.; Nguyen, K. T.; Hui, D.: Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. In: Composites Part B: Engineering, Jg. 143 (2018), S. 172–196.
- [Pau-2004] Paul, E. L. (Hrsg.): Handbook of industrial mixing – Science and practice. Wiley-Interscience, Hoboken, N.J., 2004.

- [Pou-2003] Poulesquen, A.; Vergnes, B.; Cassagnau, P.; Michel, A.; Carneiro, O. S.; Covas, J. A.: A study of residence time distribution in co-rotating twin-screw extruders. Part II: Experimental validation. In: *Polymer Engineering and Science*, Jg. 43 (2003) Nr. 12, S. 1849–1862.
- [Pua-2000] Puaux, J.; Bozga, G.; Ainsler, A.: Residence time distribution in a corotating twin-screw extruder. In: *Chemical Engineering Science*, Jg. 55 (2000) Nr. 9, S. 1641–1651.
- [Raw-2013] Rawlings, J. B.; Ekerdt, J. G.: *Chemical reactor analysis and design fundamentals*. Nob Hill Publishing, Madison, Wisconsin, 2013.
- [Raz-2023] Razavi, S. M.; Román-Ospino, A. D.; Bhalode, P.; Scicolone, J.; Callegari, G.; Dubey, A.; Koolivand, A.; Krull, S.; Tian, G.; Xu, X.; O'Connor, T.; Ierapetritou, M.; Muzzio, F.: Selection of an appropriate tracer to measure the residence time distribution (RTD) of continuous powder blending operations. In: *Powder Technology*, Jg. 429 (2023)
- [Rei-2020] Reiter, L.; Wangler, T.; Anton, A.; Flatt, R. J.: Setting on demand for digital concrete – Principles, measurements, chemistry, validation. In: *Cement and Concrete Research*, Jg. 132 (2020), S. 106047.
- [Sco-2000] Scott Howe, A.: Designing for automated construction. In: *Automation in Construction*, Jg. 9 (2000) Nr. 3, S. 259–276.
- [Seb-2019] Sebastian Escotet-Espinoza, M.; Moghtadernejad, S.; Oka, S.; Wang, Y.; Roman-Ospino, A.; Schäfer, E.; Cappuyns, P.; van Assche, I.; Futran, M.; Ierapetritou, M.; Muzzio, F.: Effect of tracer material properties on the residence time distribution (RTD) of continuous powder blending operations. Part I of II: Experimental evaluation. In: *Powder Technology*, Jg. 342 (2019), S. 744–763.
- [Son-2003] Song, Y.; Thibault, J.; Kudra, T.: Dynamic Characteristics of Solids Transportation in Rotary Dryers. In: *Drying Technology*, Jg. 21 (2003) Nr. 5, S. 755–773.
- [Ste-2022] Stephan Ueberbach: Ab 2030 nur noch klimaneutrale Neubauten? <https://www.tagesschau.de/ausland/eu-klimaneutrale-neubauten-101.html>, Aufruf am 02.01.2024.
- [Tan-2022] Tan, Y.; Dahlenburg, M.; Fottner, J.; Kessler, S.: Influencing factors of the mixing performance of a near-nozzle continuous mixer for 3D

- concrete printing: An analysis based on spatial Lacey mixing index (SLMI). In: Powder Technology, Jg. 403 (2022), S. 117414.
- [Tod-1975] Todd, D. B.: Residence time distribution in twin-screw extruders. In: Polymer Engineering and Science, Jg. 15 (1975) Nr. 6, S. 437–443.
- [Tsa-1994] Tsai, W.-R.; Lin, C.-I.: On the mixing of granular materials in a screw feeder. In: Powder Technology, Jg. 80 (1994) Nr. 2, S. 119–126.
- [Unl-2002] Unlu, E.; Faller, J. F.: RTD in twin-screw food extrusion. In: Journal of Food Engineering, Jg. 53 (2002) Nr. 2, S. 115–131.
- [Vas-2022] Vasilic, K.; Hack, N.; Kloft, H.; Lowke, D.; Mechtcherine, V.; Nerella, V. N.; Wangler, T.: Digitale Fertigung im Betonbau. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): BetonKalender 2022. Wiley, 2022, S. 691–724.
- [Waj-2007] Waje, S. S.; Patel, A. K.; Thorat, B. N.; Mujumdar, A. S.: Study of Residence Time Distribution in a Pilot-Scale Screw Conveyor Dryer. In: Drying Technology, Jg. 25 (2007) Nr. 1, S. 249–259.
- [Wan-2005] Wang, K.; Hu, J.: Use of a Moisture Sensor for Monitoring the Effect of Mixing Procedure on Uniformity of Concrete Mixtures. In: Journal of Advanced Concrete Technology, Jg. 3 (2005) Nr. 3, S. 371–383.
- [Wan-2022] Wangler, T.; Pileggi, R.; Gürel, S.; Flatt, R. J.: A chemical process engineering look at digital concrete processes: critical step design, inline mixing, and scaleup. In: Cement and Concrete Research, Jg. 155 (2022), S. 106782.
- [Wol-1976] Wolf, D.; White, D. H.: Experimental study of the residence time distribution in plasticating screw extruders. In: AIChE Journal, Jg. 22 (1976) Nr. 1, S. 122–131.
- [Yia-2017] Yianatos, J.; Vinnett, L.; Panire, I.; Alvarez-Silva, M.; Díaz, F.: Residence time distribution measurements and modelling in industrial flotation columns. In: Minerals Engineering, Jg. 110 (2017), S. 139–144.
- [Zey-2020] Zeyad, A. M.; Almalki, A.: Influence of mixing time and superplasticizer dosage on self-consolidating concrete properties. In: Journal of

Materials Research and Technology, Jg. 9 (2020) Nr. 3, S. 6101–6115.

[Zha-2017] Zhang, X.-M.; Feng, L.-F.; Hu, G.-H.: Measurement and Modeling of Local Residence Time Distributions in a Twin-Screw Extruder. In: Beyer, G.; Hopmann, C. (Hrsg.): Reactive Extrusion. Wiley, 2017, S. 71–100.

[Zie-2003] Ziegler, G. R.; Aguilar, C. A.: Residence time distribution in a co-rotating, twin-screw continuous mixer by the step change method. In: Journal of Food Engineering, Jg. 59 (2003) Nr. 2-3, S. 161–167.







# Abbildungsverzeichnis

---

|               |  |    |
|---------------|--|----|
| Abbildung 2-1 | Gemeinsamkeiten und Unterschiede der drei Prozesse: 3D-Betondruck, Contour Crafting und D-Shape. Abbildung übernommen von [Lim-2012].  | 5  |
| Abbildung 2-2 | Visualisierung der diversen Prozessschritte im Rahmen der Extrusionsverfahren beim 3D-Druck mit Beton. 1K Systeme beinhalten, im Gegensatz zu 2K Systemen, keinen Schritt des sekundären Mischens kurz vor der Extrusion. Abbildung übernommen von [Wan-2022]. | 7  |
| Abbildung 2-3 | Verweilzeitverteilungen verschiedener Reaktormodelle. Abbildung übernommen von [Pau-2004].   | 16 |
| Abbildung 3-1 | Rendering des GRES V1.3 in der Peripherie, Quelle: cbm, fml TUM, P. Schneider  | 23 |
| Abbildung 3-2 | Links: Leimfass mit PFT Mixer Rechts: Wendelrührer   | 25 |
| Abbildung 3-3 | Leim Mischer   | 25 |
| Abbildung 3-4 | Mischwelle mit aufgeklemmter Stauscheibe   | 26 |
| Abbildung 4-1 | Bild einer Sonde zur Leitwertmessung Quelle: PHYWE, E. Tellbach  | 32 |
| Abbildung 4-2 | Elektrische Schaltung, um die elektrische Leitfähigkeit des Mörtels zu überwachen  | 33 |
| Abbildung 4-3 | Zwischenstück für die Tracerzugabe   | 35 |
| Abbildung 4-4 | Frisch geschnittene Tracerpartikel   | 36 |
| Abbildung 4-5 | Rohr und Stößel für die Tracerzugabe   | 38 |
| Abbildung 4-6 | Dichtung am Anfang des Mischbereichs   | 38 |
| Abbildung 4-7 | Kurzer Mischbereich mit Rohr für Tracerzuführung   | 39 |
| Abbildung 4-8 | Ergebnisse des ersten Kalibrierungsversuchs. Gut zu erkennen ist ein ausgeprägter Peak bei 60 Sekunden und das vollständige Verlassen des letzten Tracers aus dem System nach 150 Sekunden.  | 40 |

|                |  |    |
|----------------|--|----|
| Abbildung 4-9  | Ergebnisse des zweiten Kalibrierungsversuchs. Ein eindeutiger Peak ist nicht mehr zu erkennen und auch ein abruptes Ende der Tracerpartikelausscheidung ist nicht erkennbar.   | 40 |
| Abbildung 4-10 | Frisch befüllte Eimer direkt vor dem Wiegen  | 42 |
| Abbildung 4-11 | Befüllter Eimer beim Wiegen  | 42 |
| Abbildung 4-12 | Gewogene und mit Wasser befüllte Eimer   | 43 |
| Abbildung 4-13 | Ausgefischte Tracerpartikel am Magneten  | 43 |
| Abbildung 4-14 | Ergebnisse des ersten Versuchstages mit dem in Tabelle 4-1 beschriebenen Parametersatz Nr. 1. In der oberen Hälfte ist die im System verbleibende Anzahl an Tracern über die Zeit zu sehen. In der unteren Hälfte kann man die über die Zeit ausgewaschenen Tracer sehen.  | 46 |
| Abbildung 4-15 | Ergebnisse des zweiten Versuchstages mit dem in Tabelle 4-1 beschriebenen Parametersatz Nr. 1. In der oberen Hälfte ist die im System verbleibende Anzahl an Tracern über die Zeit zu sehen. In der unteren Hälfte kann man die über die Zeit ausgewaschenen Tracer sehen. | 47 |
| Abbildung 4-16 | Ergebnisse des fünften Versuchstages mit dem in Tabelle 4-1 beschriebenen Parametersatz Nr. 2. In der oberen Hälfte ist die im System verbleibende Anzahl an Tracern über die Zeit zu sehen. In der unteren Hälfte kann man die über die Zeit ausgewaschenen Tracer sehen. | 48 |
| Abbildung 4-17 | Ergebnisse des dritten Versuchstages mit dem in Tabelle 4-1 beschriebenen Parametersatz Nr. 3. In der oberen Hälfte ist die im System verbleibende Anzahl an Tracern über die Zeit zu sehen. In der unteren Hälfte kann man die über die Zeit ausgewaschenen Tracer sehen. | 50 |
| Abbildung 4-18 | Ergebnisse des vierten Versuchstages mit dem in Tabelle 4-1 beschriebenen Parametersatz Nr. 3. In der oberen Hälfte ist die im System verbleibende Anzahl an Tracern über die Zeit zu sehen. In der unteren Hälfte kann man die über die Zeit ausgewaschenen Tracer sehen. | 51 |
| Abbildung 4-19 | Ergebnisse des sechsten Versuchstages mit den in Tabelle 4-1 beschriebenen Parametersatz Nr. 4. Zu sehen sind die über die Zeit ausgewaschenen Tracer  | 52 |
| Abbildung 4-20 | Ergebnisse des sechsten Versuchstages mit den in Tabelle 4-1 beschriebenen Parametersatz Nr. 4. Zu sehen sind die im System verbleibenden Tracer über die Zeit.  | 53 |

- Abbildung 4-21 Mörtel aus dem Mischbereich mit dem in Tabelle 4-1 beschriebenen Parametersatz Nr. 4. Deutlich zu erkennen an dem noch Weißen Poraver ist die zu geringe Mischenergie. 53
- Abbildung 4-22 Mittelwerte der einzelnen Parametersätze. Zu sehen ist die im System verbleibende Anzahl an Tracern über die Zeit. 54
- Abbildung 4-23 Mittelwerte der einzelnen Parametersätze. Man kann sehen wie die Tracer im Laufe der Zeit aus dem System ausgewaschen wurden. 55

## Tabellenverzeichnis

---

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Tabelle 3-1 | Entscheidungsmatrix Tracerauswahl. A = Gesundheitsrisiko, B = Entsorgungsaufwand, C = Materialkosten, D = Detektierbarkeit, E = Reinigungsaufwand, F = Aufwand Detektierbarkeit, G = Homogenität mit Material | 28 |
| Tabelle 4-1 | Parameter der durchgeführten Versuche   | 41 |

