

Modellierung und Simulation von Vollmantelzentrifugen als ein Aspekt der voranschreitenden Digitalisierung in der Fest/Flüssig-Trennung

Simon Hammerich*, Marco Gleiß* und Hermann Nirschl

Im Zuge der Initiative Industrie 4.0 erhöht sich der Digitalisierungsgrad auch in der Prozessindustrie. Eine enge Verknüpfung von Analyseverfahren und dynamischer Prozessmodelle erlaubt die Optimierung der Prozesskontrolle und Steuerung auch in der industriellen Trenntechnik. Zu diesem Zweck müssen mathematische Modelle zur Beschreibung der Prozessebene in Echtzeit bekannt sein. Im Bereich der Fest/Flüssig Trennung erzwingt die voranschreitende Digitalisierung die Entwicklung von numerischen Methoden und von Short cut Modellen zur Vertiefung des Prozessverständnisses und der besseren Auslegung der Anlagen. Aufgelöste Strömungssimulationen dienen hier als Unterstützung zu Experimenten und zur Ableitung geeigneter Short cut Modelle. Am Beispiel von Vollmantelzentrifugen wird die Entwicklung dynamischer Prozessmodelle und deren Anwendung beschrieben.

Schlagwörter: Digitalisierung, Dynamische Prozessmodelle, Numerische Strömungssimulationen, Prozesssteuerung, Zentrifugation

Modeling and Simulation of Solid-Bowl Centrifuges as an Aspect of the Advancing Digitization in Solid-Liquid Separation

As a part of the initiative Industry 4.0, the level of digitization in the process industry is increasing. Through a close link between analytics and dynamic modeling, digitization enables the optimization in processing industry or the model based control. For this purpose, mathematical models of the process level enabling real time simulations have to be known. In the field of solid liquid separation the advancing digitization forces the development of numerical flow simulation methods and short cut models to deepen process understanding and mathematical process modeling. Resolved flow simulations should be seen as support for experiments to develop suitable dynamic models for short cut models. Based on the prerequisites, the development of dynamic process models and their application using the example of solid bowl centrifuges is described.

Keywords: Centrifugation, Digitization, Dynamic process models, Numerical flow simulation, Process control

1 Einleitung

Die derzeit in der Industrie stark voranschreitende Digitalisierung im Rahmen der Initiative Industrie 4.0 hat starke Auswirkungen auf die Kernprozesse „Supply Chain“ inklusive Produktion, „Asset Lifecycle“ sowie kundenorientierte, datengetriebene Geschäftsmodelle [1]. Treiber dieser Entwicklung war bisher die Fertigungstechnik, wobei in der Zwischenzeit die Prozessindustrie die Chancen und auch die Risiken (u. a. die Datensicherheit) erkannt hat. Die Digitalisierung der Prozesse zur Partikelproduktion ist sehr vielschichtig, wobei ein wesentlicher Aspekt die besonders von den Universitäten und Forschungseinrichtungen vorange-

triebene Simulation mit der zugehörigen Erfassung der Produkteigenschaften umfasst. Eine der Säulen ist eine umfangreiche Simulation der Prozesse auf unterschiedlichen Zeit und Längenskalen. Sicherlich sind nicht für jeden Prozess alle Skalen und Ebenen abzubilden, alleine jedoch die Entwicklung von Short cut Modellen zur schnellen Simulation

Simon Hammerich, Marco Gleiß, Prof. Dr. Ing. Hermann Nirschl
simon.hammerich@kit.edu, marco.gleiss@kit.edu
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, Straße am Forum 8, 76131 Karlsruhe, Deutschland.

im Wechselspiel mit der Automatisierungstechnik ist ein bislang nicht intensiv verfolgtes Forschungsfeld.

Die derzeit zur Verfügung stehenden Simulationstools sind relativ fokussiert und betrachten einen Prozess nicht in seiner gesamten Breite, sondern zum einen entlang der Prozesskette und zum anderen in seiner verfahrenstechnischen Tiefe im Hinblick auf die Reaktionstechnik oder den Energie- und Rohstoffeinsatz. Es ist daher denkbar, mittels eines zu entwickelnden Datenmodells die verschiedenen Simulationstools zu koppeln und einen Datenaustausch sicherzustellen [2]. Dies ist für den Prozessbetrieb in Wechselwirkung mit der Automatisierungstechnik sinnvoll und erlaubt die prädiktive Prozessentwicklung. Dadurch können unvorhergesehene Ereignisse, unzureichende Prozesssteuerungen und somit Fehlchargen in der Prozessindustrie vermieden werden. Für eine industriennahe Simulation stellen sich die folgenden Herausforderungen:

Eine ganzheitliche Simulation entlang der kompletten Prozesskette ist für die Verfolgung der Produktentstehung von Vorteil. Dies beinhaltet auch die Einbindung von Energie- und Rohstoffeffizienz, Kosten, Lebenszyklus sowie die dazugehörigen Optimierungstools [3].

Die Kopplung von Simulationsverfahren (Fluid, Struktur, Partikel, Molekularsimulation etc.) auf mehreren Ebenen erscheint ein möglicher Weg zur ganzheitlichen Betrachtung partikulärer Prozesse [2]; allerdings immer im Hinblick auf eine Echtzeit-Simulation mit Short cut Modellen mit dem nur unbedingt notwendigen Detaillierungsgrad.

Prädiktive Prozesssimulationen sind derzeit nicht möglich, würden jedoch eine vorausschauende Steuerung und Regelung erlauben.

Aufgrund der komplexen Materialparameter ist ein klassischer Scale up anhand der üblichen auf Kennzahlen basierenden Methoden nicht mehr zielführend [4]. Prozess-Simulationen auf der Makroskala, in denen auch das komplexe Materialverhalten abgebildet ist, sind dafür jedoch ein nicht mehr zu vernachlässigendes Werkzeug [5].

Big Data ist ein weiteres in der Industrie 4.0 häufig benutztes Schlagwort. Die Abstraktion und Nutzarmachung der für die Prozesssteuerung oder für die Produktqualität unbedingt notwendigen Daten ist ein lohnendes Forschungsziel.

Die Mathematik stellt umfangreiche Optimierungsalgorithmen, wie das Quasi-Newton- oder das SQP-Verfahren, zur Verfügung [6]. Diese Methoden sind bei den Prozessentwicklern nur bedingt bekannt und finden daher wenig Anwendung. Eine Einbindung von derartigen Tools zur Optimierung der Prozesse auf den verschiedenen Ebenen ist eine lohnende zukünftige Forschungsaufgabe.

Nicht zuletzt ist die Entwicklung von Ausbildungs- und Trainingstools ein wichtiger Baustein. In der Prozessindustrie eingesetzte Anlagen werden häufig im 24 h-Betrieb gefahren. Eine Ausbildung für Prozessverantwortliche und ein Training für das Studium von unge-

wöhnlichen Betriebszuständen ist an realen Prozessen nicht realisierbar [7].

Im Gegensatz zur Fertigungstechnik ist für die Prozessindustrie die Gewinnung von Messdaten zur Charakterisierung der Produkteigenschaften von entscheidender Bedeutung. Für die Simulation sind in der Partikeltechnik physikalische Parameter wie die Partikelform, die Partikelgröße, die Agglomeratstruktur, die Wechselwirkungen zwischen den Partikeln, die Grenzflächeneigenschaften oder das Fließverhalten zu charakterisieren. Diese Parameter bestimmen das Verhalten des gesamten Materials als Kollektiv, was bisher in Simulationen nur sehr schwer oder gar nicht berücksichtigt wird. Eine Verbindung dieser partikelcharakterisierenden Parameter mit anwendungstechnischen Eigenschaften (z. B. Rollwiderstände, Härte und Festigkeiten von Werkstoffen) wäre ein wichtiger Forschungsgegenstand. Scale up-Ansätze scheitern im Feststoffbereich, da sich beispielsweise die Feststoffförderung innerhalb von Trennaggregaten nicht vorhersagen lässt [8]. Weiterhin können In situ-Messungen zur Ermittlung von Partikelformen und Agglomeratstrukturen Vorhersagen hinsichtlich einer Klarsierung oder Abscheidung erleichtern.

Im Hinblick auf eine flexible, robuste Prozessgestaltung sind somit Online- oder besser noch In situ-Messverfahren notwendig, die als Schnittstelle zur Simulation dienen. Daraus lassen sich Daten in Echtzeit zur Verfügung stellen, die wiederum als Ist-Werte für die übergeordnete Validierung dienen. Darüber hinaus erfordern die heute verfügbaren Messtechniken teilweise umfangreiche und zeitaufwendige Datenanalysen. Schnelle, multivariate Analysemethoden erscheinen daher unverzichtbar für eine sichere Prozesssteuerung.

Abb. 1 zeigt ein mögliches Vernetzungsschema einzelner Unit-Operations zu einer verfahrenstechnischen Prozesskette und die Möglichkeit der Beeinflussung durch skalenübergreifende Simulationen sowie die Kopplung mit der Automatisierungstechnik. Ausgehend von einzelnen, verketteten Unit-Operations, die nicht notwendigerweise im Batchbetrieb miteinander verbunden sein müssen, erfolgt zwischen den einzelnen Prozessschritten eine Messung der produktcharakterisierenden Eigenschaften der jeweiligen Zwischenprodukte, ausgehend von der Charakterisierung der eingesetzten Rohstoffe bis hin zum fertigen Produkt. Die gemessenen Daten dienen zur Validierung und Kalibrierung der eingesetzten Simulationen auf der partikulären Ebene. An dieser Stelle erfolgt eine tiefgehende mathematische Beschreibung des Prozessverhaltens mit einem sehr hohen Detaillierungsgrad, wobei zur Beschreibung der Produkteigenschaften durchaus auch multiskalige Simulationen notwendig sein können. Das Ziel von derartigen Simulationen ist die Entwicklung von Short cut Modellen, die einen wesentlich höheren Abstraktionsgrad im Vergleich zu den Simulationen auf der partikulären Ebene aufweisen, jedoch für die Berechnung der Prozesskette wesentlich schneller Vorhersagen zulassen. Ein wesentlicher Vorteil dieser Short cut Modelle besteht in der Simulation in Echt-

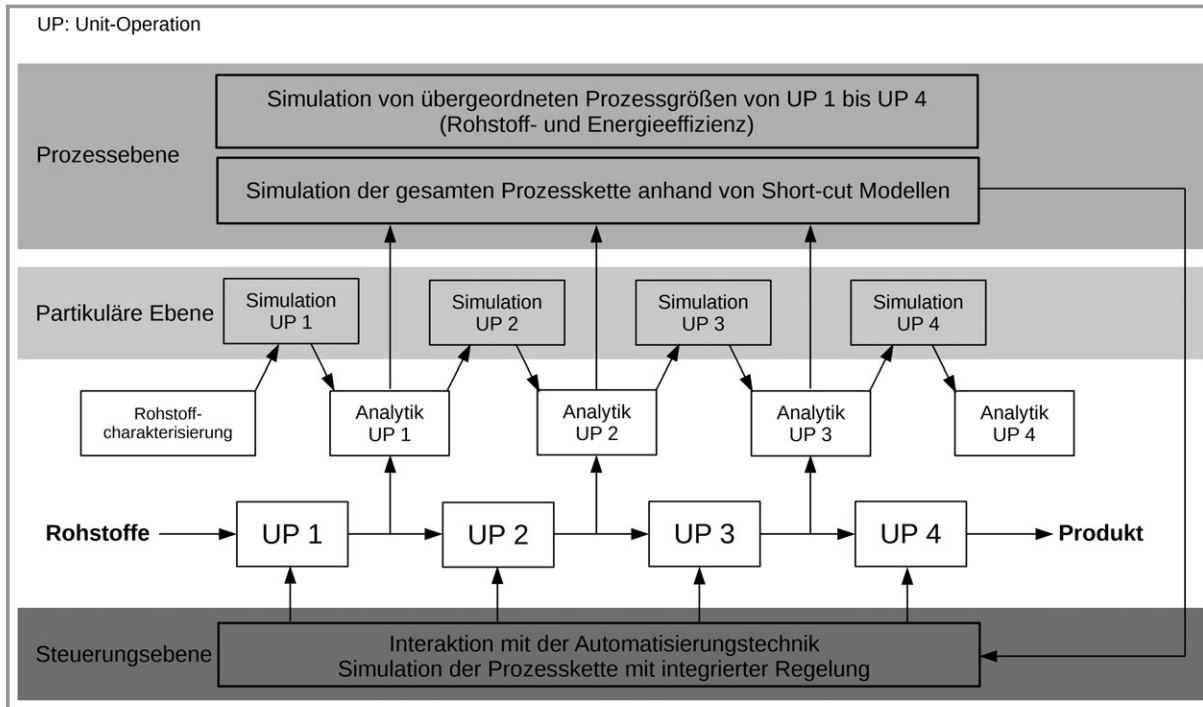


Abbildung 1. Schematische Darstellung des Vernetzungsschemas eines verfahrenstechnischen Prozesses ausgehend von Analytik, skalenübergreifender Simulation und Verknüpfung mit der Automatisierungstechnik.

zeit. Dies erlaubt die Vorausberechnung des Prozesses, um eintretende kritische Zustände durch eine frühzeitige Regelung abzuwenden. Diese Modelle stellen auch einen Ausgangspunkt für Optimierungen dar, die eine inverse Simulation zulassen.

Darüber hinaus ist es denkbar, auf der Prozessebene die Short cut Modelle dahingehend zu erweitern, dass überordnete Prozessgrößen, wie die Rohstoff und Energieeffizienz, in die Betrachtungen mit einbezogen werden. Nicht zuletzt ist an dieser Stelle eine Kopplung zur Steuerungsebene denkbar. Die aus der Simulation erhaltenen Daten können durch eine Datenanalyse derart aufgearbeitet werden, dass diese direkt als Stellgrößen für die Automatisierungstechnik, sowohl für den realen Prozess als auch für Simulationen, dienen. Der vorliegende Artikel zeigt die beschriebene Vorgehensweise am Beispiel von partikulären Separationsprozessen für zwei Zentrifugen Typen.

2 Grundlegende Voraussetzungen für die Simulation und digitale Kontrolle von Fest/Flüssig-Trennprozessen

Für die Simulation sowie digitale Kontrolle und Regelung von Fest/Flüssig Trennprozessen sind neben trenntechnischen Materialeigenschaften und der Prozessanalytik zur Charakterisierung der Produkteigenschaften präzise dynamische Prozessmodelle, auch Short cut genannt, notwendig. Abb.2 stellt schematisch die skalenübergreifende Modellie-

rung für Zentrifugen als Fest/Flüssig Trennprozess dar. Die Materialfunktionen können aus Experimenten oder Simulationen auf der Partikelebene abgeleitet werden und beschreiben die trenntechnischen Materialeigenschaften wie z. B. das Sedimentationsverhalten, die Haufwerksbildung im Zentrifugalfeld oder das rheologische Fließverhalten der gebildeten Haufwerke. Eine Herausforderung bei der Entwicklung von Short cut Modellen ist es, mit möglichst einfachen mathematischen Gleichungen die instationären Vorgänge bei der Separation und mechanischen Entfeuchtung präzise abzubilden. Dies setzt ein hohes Maß an Prozessverständnis und Kenntnisse der Materialeigenschaften voraus. Im Wesentlichen beeinflussen neben den Eigenschaften der dispersen und kontinuierlichen Phase auch die Prozessbedingungen den Separationsvorgang. Zusätzlich ist neben der genauen Prozessbeschreibung auch die Recheneffizienz der dynamischen Modelle von entscheidender Bedeutung. Um während des laufenden Betriebs den Einfluss von Produktschwankungen und möglicher Lastwechsel vorhersagen zu können, ist es notwendig, dass die Simulationen in Echtzeit ablaufen. Mit solchen Simulationen lassen sich in einem Bruchteil von Sekunden die Zustände für einige Minuten vorhersagen, um den Prozess vorausschauend zu steuern.

Bei halb kontinuierlich und kontinuierlich arbeitenden Fest/Flüssig Trennapparaten beeinflussen die Strömungsbedingungen die Verweilzeit und dadurch den Separationsvorgang. So steht jedem Partikel im Apparat eine definierte Verweilzeit für die Abscheidung zur Verfügung. Hier beeinflussen sowohl der Volumenstrom und die Drehzahl als

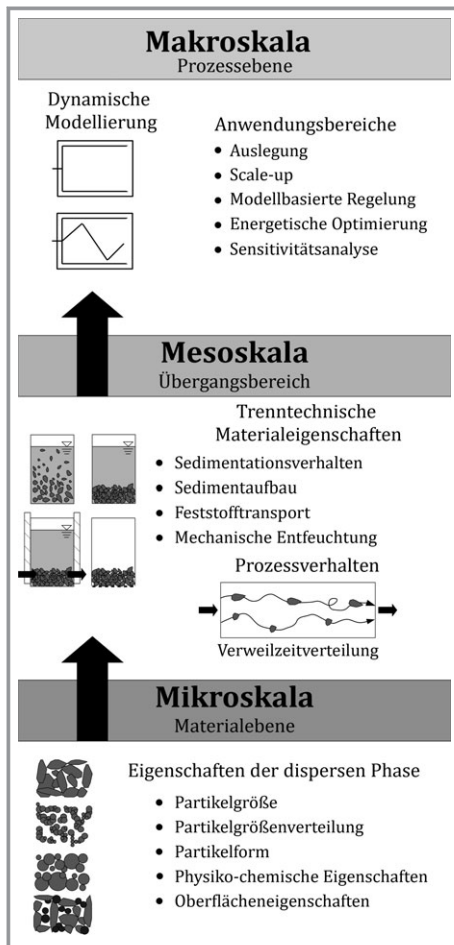


Abbildung 2. Skalenergreifende Betrachtung der relevanten Einflussgrößen für die Charakterisierung und mathematischen Modellierung der mechanischen Entfeuchtung von Vollmantelzentrifugen.

auch das gebildete Sediment den Strömungszustand. Eine prozessnahe Modellierung wird in diesem Zusammenhang nur durch das vorhandene Prozessverständnis und die Charakterisierung der notwendigen Material- und Prozesseigenschaften erreicht. Aus diesem Grund beschäftigten sich die beiden nachfolgenden Kapitel mit der notwendigen experimentellen Charakterisierung der trenntechnischen Materialeigenschaften und des Strömungszustands. Diese bilden die Grundlage für die mathematische Beschreibung der trenntechnischen Vorgänge auf der Makroskala ausgehend von einer Modellreduktion und daraus folgenden Ableitung von Short cut Modellen. An dieser Stelle sei erwähnt, dass die beschriebene Herangehensweise bei der Modellierung von Vollmantelzentrifugen auch für andere Fest/Flüssig Trennapparate wie Filterzentrifugen, Eindicker oder Filtrationsapparate denkbar ist.

3 Notwendige Charakterisierung trenntechnischer Materialeigenschaften für numerische Simulationen

Wie in Abschn. 2 diskutiert, ist die experimentelle Charakterisierung der Materialeigenschaften für die numerische Prozessunterstützung von entscheidender Bedeutung. Zu sätzlich beeinflusst die Auswahl der verwendeten trenntechnischen Eigenschaften zur Prozessbeschreibung die Güte der Simulationen und den experimentellen Aufwand.

In der Literatur werden die Eigenschaften von dispersen Systemen unter anderem in anwendungstechnische, verarbeitungstechnische und physikalisch-chemische Produkteigenschaften unterschieden [9]. In dieser Arbeit wird jedoch vereinfacht nur zwischen den Eigenschaften eines Einzelpartikels und den Bulk-Eigenschaften unterschieden. Die Partikelgröße, Partikelmorphologie, Dichte und die chemische Zusammensetzung zählen zu den Eigenschaften des Einzelpartikels. Durch die Anwesenheit einer Vielzahl an Partikeln in industriellen Prozessen leiten sich die folgenden prozessrelevanten Bulk-Eigenschaften wie Feststoffkonzentration, Sedimentationsverhalten, Kompressionsverhalten des Haufwerks, Gelpunkt, Fließverhalten und Oberflächenladung ab. Dies ist nur eine Auswahl, weitere wichtige Materialeigenschaften finden sich in [9, 10].

Die Eigenschaften der Einzelpartikel bestimmen sämtliche Eigenschaften in der Bulkphase. Trotzdem ist es mit dem heutigen Wissensstand nicht möglich, den Einfluss von Bulk-Eigenschaften auf das Prozessverhalten theoretisch aus der Charakterisierung eines Einzelpartikels abzuleiten. Der Grund hierfür liegt im Einfluss einer Vielzahl von Parametern, die wiederum untereinander wechselwirken. Zusätzlich ist die Vorhersage des Einflusses der auftretenden Partikelwechselwirkungen nicht möglich. Dadurch fehlt es allgemein an geeigneten Modellen zur Prozessunterstützung. Diese sind jedoch maßgeblich für die erfolgreiche Digitalisierung der mechanischen Flüssigkeitsabtrennung und anderer Bereiche der Verfahrenstechnik. Somit ist eine genaue Kenntnis der genannten Materialeigenschaften eine der Grundlagen für die Entwicklung prädiktiver Modelle zur Prozessbeschreibung. Im Folgenden werden relevante, trenntechnische Materialeigenschaften ausführlich diskutiert.

3.1 Partikelgrößenverteilung und Feststoffkonzentration

Die Partikelgrößenverteilung und die Feststoffkonzentration beeinflussen sämtliche Eigenschaften der dispersen Phasen während des Trennvorgangs [11]. Weiterhin sind das Erreichen definierter Feststoffkonzentrationen oder die Klassierung auf eine Partikelgrößenverteilung Ziele und somit Leitparameter für eine Prozesssteuerung. Bei der Bestimmung der Partikelgrößenverteilung ergibt sich jedoch die Herausforderung, dass Partikel von der Form ei

ner Kugel abweichen. Dadurch weisen diese Partikel keinen eindeutigen Durchmesser auf und es ist notwendig, einen Äquivalenzdurchmesser zu ermitteln. Dieser Äquivalenzdurchmesser ist wiederum abhängig vom eingesetzten Messsystem [12, 13]. Eine geeignete Wahl und Bestimmung der verwendeten Partikelgröße ist daher entscheidend für die Prozessmodellierung.

3.2 Sedimentationsverhalten

Das Sedimentationsverhalten beschreibt die Relativbewegung aufgrund von Dichteunterschieden zwischen einer dispersen und einer kontinuierlichen Phase und ist somit der entscheidende Parameter bei der Modellierung des Separationsvorgangs. Oft wird die Relativgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Stokes'schen Sinkgeschwindigkeit v_{Stokes} eines Einzelpartikels beschrieben. Die Stokes'sche Sinkgeschwindigkeit im Zentrifugalfeld ist in Gl. (1) dargestellt. Die Sinkgeschwindigkeit eines Einzelpartikels berechnet sich aus der Dichtedifferenz von Feststoff ρ_s und der Flüssigkeit ρ_l , dem Partikeldurchmesser x , dem Radius r , der Winkelgeschwindigkeit ω und der Viskosität der Flüssigkeit η . Die Abweichung des Realverhaltens zur Stokes'schen Sinkgeschwindigkeit ist in Gl. (2) verallgemeinert dargestellt. Die Anpassungsfunktion k nimmt abhängig vom gewählten Ansatz verschiedene Werte bzw. Formen an, hier sei z. B. der Ansatz von Richardson und Zaki [14] genannt.

$$v_{\text{Stokes}} = \frac{(\rho_s - \rho_l)x^2\omega \times (\omega \times r)}{18 \eta} \quad (1)$$

$$v_{\text{korrr}} = kv_{\text{Stokes}} \quad (2)$$

3.3 Fließverhalten

Das Fließverhalten der flüssigkeitsgesättigten Sedimente hat einen entscheidenden Einfluss auf das Separationsergebnis. Es beschreibt die Transportierfähigkeit der abgeschiedenen Partikel im Kollektiv und somit die Sedimentverteilung im Rotor einer Vollmantelzentrifuge [15]. Abhängig der Sedimentverteilung ergibt sich eine örtliche und zeitliche Variation der Strömungszustände während der Trennaufgabe. Sowohl Prozess als auch verschiedenste Materialeigenschaften beeinflussen das Fließverhalten. So ist das Fließverhalten unter anderem abhängig von der Partikelgröße, der chemischen Zusammensetzung, vom Kompressionsverhalten und der Oberflächenladung [16, 17]. Es sind sowohl schwer als auch leichtfließende Sedimente bekannt [18]. In Abb. 3 ist schematisch der Einfluss des Fließverhaltens auf die lokale Verteilung des Sediments in einer Röhrenzentrifuge dargestellt.

Die Kenntnis des Fließverhaltens ist somit entscheidend zur Modellentwicklung bzw. Auslegung von Trennprozessen

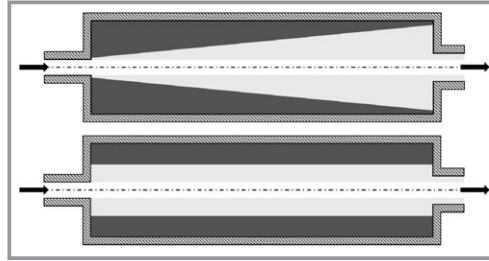


Abbildung 3. Schematische Darstellung der Sedimentverteilung in einer Röhrenzentrifuge bei einem schwerfließenden Haufwerk (oben) und einem leichtfließenden Haufwerk (unten) nach Stahl et al. [15].

sen in Vollmantelzentrifugen. Die Charakterisierung des Fließverhaltens von flüssigkeitsgesättigten Haufwerken stellt jedoch einen interdisziplinären Fachbereich zwischen der Rheologie und der Schüttgutmechanik dar. In der Literatur sind Beschreibungsansätze des Fließverhaltens auf Basis von klassischen rheologischen Modellen in Kombination mit Experimenten zur Ermittlung des Fließverhaltens bekannt [8, 16].

3.4 Oberflächenladung

In Flüssigkeit dispergierte Partikel liegen infolge von Interaktionen an der Phasengrenzfläche geladen vor. Die Oberflächenladung der dispersen Phase bestimmt die interpartikulären Wechselwirkungen, wie elektrische Anziehungs- und Abstoßungskräfte. Die Ladungsstärke ist abhängig vom pH Wert der Suspension [19]. Ein Wechsel der Oberflächenladung kann zu einer signifikanten Veränderung der trenntechnischen Materialeigenschaften führen. Aus diesem Grund ist eine experimentelle Charakterisierung der in den vorherigen Abschnitten beschriebenen trenntechnischen Materialeigenschaften beim im Prozess vorliegenden pH Wert unabdingbar. Für eine weiterführende Beschreibung des Einflusses physiko chemischer Eigenschaften auf die trenntechnischen Materialeigenschaften sei auf Literatur von Beiser et al. [20], Nirschl [11], Erk [8], Mladenchev et al. [21] und Tiselius [22] verwiesen.

4 Charakterisierung des Prozessverhaltens von Vollmantelzentrifugen

Sowohl die Strömungsbedingungen innerhalb von Vollmantelzentrifugen als auch die bisher diskutierten Materialeigenschaften bestimmen das Prozessverhalten. Die Strömungsbedingungen sind wiederum von den Materialeigenschaften, den eingestellten Prozessparametern und der Zentrifugegeometrie abhängig. Die Herausforderung bei der Charakterisierung des Prozessverhaltens beruht auf Limitierungen in der Messtechnik und den verwendeten hohen Rotationsgeschwindigkeiten. Die Strömungsmessung

in Vollmantelzentrifugen stellt infolge von Einbauten und der Rotationsbewegung einen komplexen Vorgang dar. In der Literatur sind einige experimentelle Strömungsuntersuchungen in flüssigkeitsgefüllten Zentrifugen bekannt [23, 24]. Jedoch ist es nicht möglich den gesamten Vorgang in der Maschine experimentell aufzulösen. Daher werden aktuell zur Beschreibung des Prozessverhaltens stark vereinfachte Modelle, wie die Theorie der äquivalenten Klärfläche, genutzt [25–27]. Diese Modelle beschreiben das Grenzkrin in einer mit Flüssigkeit gefüllten Maschine unter Vernachlässigung des realen Strömungsverhaltens. Weiterhin wird der Trennapparat als Blackbox betrachtet, wodurch sich diese Ansätze ausschließlich zur Berechnung stationärer Zustände eignen. Instationäre Vorgänge wie sie bei der Durchströmung, der Sedimentation, der Haufwerksbildung oder bei Lastwechseln auftreten, finden keine Berücksichtigung. Am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik (IMVM) des Karlsruher Instituts für Technologie wurden deshalb ausgehend von Analogien aus der Mess- und Regelungstechnik und mithilfe der numerischen Strömungssimulationen neue Algorithmen entwickelt, die eine prozessnahe Beschreibung transienter Vorgänge während der Separation in Vollmantelzentrifugen erlauben.

Die Grundidee ist hier das Prozessverhalten über Änderungen der Prozessantwort zu beschreiben. Dafür wird der Prozess als Blackbox mit einer variablen Anzahl an Ein- und Ausgangsströmen betrachtet [5]. Zur Untersuchung der Strömungsbedingungen eignen sich Verfahren aus der Fluidverfahrenstechnik, die zur Ermittlung des Verweilzeitverhaltens eingesetzt werden. Verweilzeitverteilungen F finden eine breite Anwendung in der Verfahrenstechnik [28–31].

Die Verweilzeitverteilung ist eine indirekte Methode zur Charakterisierung der Strömungsbedingungen. Eine Möglichkeit der Verweilzeitmessung stellt die sprunghafte Aufgabe eines Spurstoffs am Einlauf des Apparates dar. Durch die Aufzeichnung der Spurstoffänderung am Ausgang folgt als Ergebnis die Verweilzeitverteilung [32]. Aus dem Verweilzeitverhalten lassen sich Rückschlüsse über die Strömungsbedingungen, Totzonen und Bereiche mit hoher Rückvermischung ziehen. Je breiter eine Verweilzeitverteilung, umso größer ist der Einfluss axialer Dispersion. Eine ausführliche Diskussion der Vor- und Nachteile dieser Betrachtungsweise geben Platzer et al [33].

In Abb. 4 sind beispielhaft die auf die mittlere Verweilzeit normierten Verweilzeitverteilungen eines idealen kontinuierlichen Rührreaktors (CSTR), eines idealen Pfröpfenstromreaktors (PFR) und eines nicht idealen Prozesses dargestellt [32]. Ein idealer CSTR stellt ein System mit maximaler Rückvermischung dar. In einem idealen PFR tritt keine Rückvermischung auf. Das reale Verhalten liegt in den meisten Fällen zwischen den beiden beschriebenen Grenzfällen. Zusätzlich ist die Kenntnis der zeitlichen Reaktion des Gesamtsystems auf Änderungen von Prozessparametern und Materialeigenschaften, wie die Partikelgrößenverteilung oder Feststoffkonzentration, entscheidend für die

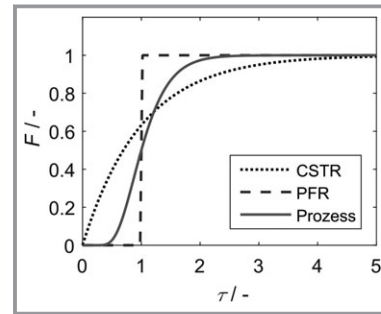


Abbildung 4. Vergleich der Verweilzeitverteilungen F eines idealen kontinuierlichen Rührkessels, eines idealen PFR und dem realen Verweilzeitverhalten bei der Separation. Die Durchstromungsziffer τ entspricht der auf die mittlere Verweilzeit bezogenen Zeit.

Prozessmodellierung. Die Bestimmung erfolgt dabei analog zu Verweilzeitverteilungen ausgehend von der sprunghaften Änderung von Systemgrößen.

4.1 Aufgelöste CFD-Simulationen zur Untersuchung des Prozessverhaltens

Die experimentellen Untersuchungen sind nur ein Schritt auf dem Weg zum tieferen Prozessverständnis. Sie liefern keine detaillierten Informationen über den zeitlichen Verlauf des Füllgrads oder die Sedimentverteilung entlang des Rotors. Durch die wachsende Rechenleistung halten CFD Simulationen Einzug in einige Bereiche der Verfahrenstechnik. In der Literatur sind inzwischen sowohl eigen entwickelte als auch Standardmethoden zur numerischen Beschreibung von Mehrphasenströmungen und zur Strömungsuntersuchung in Zentrifugen bekannt [34–38]. Um auch in der mechanischen Flüssigkeitsabtrennung für semi batch oder kontinuierlich betriebene Vollmantelzentrifugen aufgelöste Simulationen als Unterstützung zu experimentellen Untersuchungen nutzen zu können, befasst sich das IMVM seit einiger Zeit mit der räumlichen und zeitlichen Auflösung des Strömungsfelds. Dabei steht die Entwicklung von neuen Ansätzen basierend auf der numerischen Strömungssimulation (CFD) im Vordergrund. Hier werden die Navier Stokes Gleichungen mit dem Fließverhalten flüssigkeitsgesättigter Haufwerke verknüpft und so der Trennprozess aufgelöst dargestellt [39].

Allgemein ist die Handhabung einer großen Anzahl an Partikeln die Herausforderung bei Simulationen in der Partikeltechnik. Bei Vollmantelzentrifugen treten außerdem hohe Strömungsgeschwindigkeiten auf. Zusätzlich ändert sich das Materialverhalten am Übergang von dispergierten Partikeln zu einem Haufwerk. Weiterhin kommt es zu einer Wechselwirkung zwischen Maschinen und Materialverhalten. Gleichzeitig erfordern die hohen Strömungsgeschwindigkeiten und die Vielzahl an physikalischen Vorgängen eine möglichst in Bezug auf die Rechenzeit effiziente Vorgehensweise. Allein die hohen Strömungs

geschwindigkeiten bedingen einen Zeitschritt im Bereich von $\Delta t \approx 10^{-4} - 10^{-6}$ s für stabile numerische Simulationen. Somit ist ein Kompromiss zwischen physikalischer Auflösung der trenntechnischen Vorgänge und des Rechenzeitbedarfs notwendig.

Eine weitverbreitete numerische Methode zur Beschreibung von Mehrphasenströmungen ist der Euler Euler Ansatz. Hier werden die einzelnen Phasen als wechselwirkende Kontinua betrachtet. Die Wechselwirkungen zwischen den Phasen sind mittels Quellen und Senken beschrieben [34]. Die Berücksichtigung der Partikelgrößenverteilung erfordert das Lösen der Massen- und Impulserhaltung für jede Größenklasse, was aktuell einen nicht zu lösenden Rechenaufwand darstellt. Die hohe Anzahl an Partikeln im Rotor lässt außerdem keine Anwendung der Euler Lagrange Methode zu [34]. Somit sind klassische Ansätze zu rechenintensiv, um den Trennprozess innerhalb von Vollmantelzentrifugen mit ausreichender Genauigkeit und die vorhandenen Zeitskalen abzubilden.

Das Zwei Phasen System bestehend aus disperser Phase und Flüssigkeit wird mit dem am IMVM entwickelten Modell als Mischphase modelliert [39]. Dieser Ansatz ist dem sogenannten *Fast Eulerian Approach* von Ferry et al. [40] angepasst. Mit der Implementierung einer Partikelklasse erweitert sich dieses Modell jeweils um eine Transportgleichung für den Feststoffvolumenanteil. Die Beschreibung der Rückwirkung disperser Phase auf die Strömung erfolgt nicht über Quellterme, sondern mittels ortsabhängigen Viskositätsfunktionen, die zwischen Suspension und Sediment unterscheiden. Die Modellierung der instationären Strömungsbedingungen durch einen quasi stationären Ansatz verringert zusätzlich den benötigten Rechenaufwand. Eine detaillierte Beschreibung der Simulationmethode zeigen Hammerich et al. [39]. Weiterhin ist das Kompressionsverhalten flüssigkeitsgesättigter Haufwerke im mathematischen Modell eingebunden und erlaubt so die Simulation des Realbetriebs.

Trotz sämtlicher Maßnahmen zur Reduktion der Rechendauer ergibt sich je nach Rotationsgeschwindigkeit, Partikel

anzahl und der Größe des Rechengitters eine Simulationszeit im Bereich von einigen Stunden bis hin zu mehreren Tagen. Grund dafür ist die bereits diskutierte kleine Zeitschrittweite infolge der hohen Geschwindigkeitsgradienten. Die entwickelte Simulationmethode stellt einen Kompromiss zwischen physikalischer Auflösung der trenntechnischen Vorgänge und des Rechenzeitbedarfs dar. Dies erlaubt es, die gesamte Maschine in Kombination mit den technischen Materialeigenschaften zu simulieren. Ein Einsatzgebiet dieser Methode ist die Optimierung der Zentrifugen Geometrie und die Ableitung von Short cut Modellen zur Beschreibung der Prozessebene. Im Falle dieser Arbeit ist der Einfluss des Sediments auf die Strömungsbedingungen und somit auf das Verweilzeitverhalten von Interesse.

In Abb. 5 sind beispielhaft vier ermittelte Verweilzeitverteilungen mit den dazugehörigen Sedimentprofilen und Strömungszuständen abgebildet. Dabei strömt die Suspension von der linken Seite nach rechts in Richtung des Überlaufs. Der Einfluss des sich bildenden Sediments auf die Strömung und somit auf die Verweilzeitverteilungen ist gut zu erkennen. Zum Startzeitpunkt entspricht der Zustand einer flüssigkeitsgefüllten Röhrenzentrifuge. Mit der Zeit baut sich das Sediment an der Rotorinnenwand auf. Wie zu erwarten, verschieben sich die Verweilzeitverteilungen mit steigendem Füllgrad zu kleineren Verweilzeiten.

Gleichzeitig lassen sich Informationen über Einflussfaktoren und Prozesszustände ableiten, die experimentell meist nicht zugänglich sind. Einen solchen Parameter stellt der Einfluss des Fließverhaltens auf die Sedimentverteilung dar.

Auf der linken Seite in Abb. 6 ist der Einfluss des Fließverhaltens auf die Strömung innerhalb des Rotors für einen Zeitschritt von $t = 100$ s dargestellt. Im gezeigten Fall strömt die Suspension von links nach rechts. Das Fließverhalten für den Zustand 1 (Z1) entspricht einem schwerfließenden Haufwerk. Zustand 2 (Z2) stellt das Fließverhalten eines leichtfließenden Haufwerks dar. An dieser Stelle sei angemerkt, dass in Abb. 6 sowohl die Geometrie als auch die Prozessbedingungen konstant sind. Die Unterschiede in der Sedimentverteilung und im Strömungszustand sind hier auf

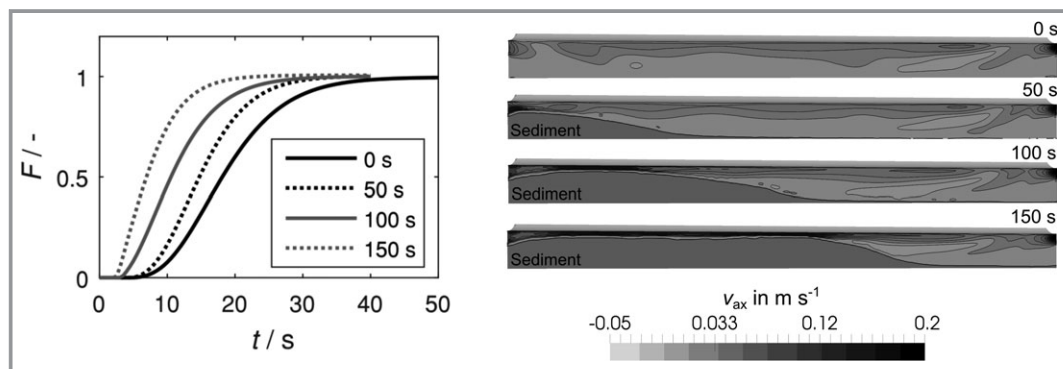


Abbildung 5. Links: Verweilzeitverteilung F in Abhängigkeit der Zeit für vier Zeitschritte $t = 0$ s, 50 s, 100 s und 150 s der numerischen Simulation. Rechts: Darstellung der Sedimentkontur und der Veränderung der axialen Komponente der Strömungsgeschwindigkeit v_{ax} für die bereits beschriebenen Zeitschritte.

das eingestellte Fließverhalten zurückzuführen. Das Diagramm auf der rechten Seite in Abb. 6 zeigt die Verweilzeitverteilung in Abhängigkeit der Durchströmungsziffer τ , die das Verhältnis aus aktuellem Zeitschritt zur mittleren Verweilzeit beschreibt. Beim Vergleich der beiden Verteilungen untereinander sowie mit der Ausgangsverteilung fällt auf, dass abhängig vom Sedimentaufbau in der Zentrifuge sich die Breite der Kurven ändert. Bei einem schwerfließenden Sediment liegt eine inhomogene Sedimentverteilung vor und es kommt infolge der schnellen Aufweitung des Querschnitts am Übergang zu einer stärkeren Rückvermischung und somit axialen Dispersion. Beim leichter fließenden Sediment ist das Sediment gleichmäßig an der Rotorinnenwand verteilt und hat damit eine geringe axiale Rückvermischung zur Folge.

5 Dynamische Modellierung der Prozessebene und Echtzeit-Simulationen

In der Literatur sind eine Reihe von Ansätzen zur Beschreibung der Separation und der Kuchenbildung im Erdschwere sowie Zentrifugalfeld vorhanden. Die Grundlage der meisten Modelle bildet das Kynch Theorem [41]. Kynch trifft die Annahme, dass das Sedimentationsverhalten von der lokalen Feststoffkonzentration abhängt. Ausgehend von einer differentiellen Bilanz um ein Volumenelement ergibt sich daraus der zeitliche Verlauf der Feststoffkonzentration entlang der wirkenden Feldkraft. Garrido et al. [42], Bürger et al. [43] und Stickland et al. [44] erweitern die Kynch Theorie auf den Kuchenbildungsvorgang eines kompressiblen Haufwerks sowohl für das Erdschwere als auch das Zentrifugalfeld. Das resultierende Gleichungssystem hat die Form einer hyperbolisch parabolischen Differentialgleichung, die ausschließlich mittels numerischer Methoden lösbar ist. Die Schwierigkeit in der Beschreibung des Sedimentationsvorgangs liegt im sprunghaften Übergang des

Materialverhaltens von der Suspension zum Haufwerk. Dies führt zu kleinen Zeitschrittweiten, was keine Echtzeit Simulationen der trenntechnischen Vorgänge erlaubt. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass Bürger et al. [43] und Stickland et al. [44] ausschließlich die Batch Zentrifugation im Labor Maßstab betrachten. Eine Übertragung auf Prozess zentrifugen oder den industriellen Maßstab wurde nicht durchgeführt.

Echtzeit Simulationen sind eine weitere Voraussetzung für die Anwendung dynamischer Prozessmodelle auch zur modellbasierten Regelung in der mechanischen Flüssigkeitsabtrennung. Beispiele für derartige dynamische Modelle sind bisher nur für statische Eindicker bekannt. Takacs et al. [45] und Zheng et al. [46] stellen die Aufkonzentrierung einer Suspension im statischen Eindicker mittels eines Ersatzschaltbildes dar. Für die mathematische Modellierung wird der Trennapparat in eine definierte Anzahl an Schichten entlang der wirkenden Feldkraft unterteilt und für jede Schicht eine Bilanzgleichung sowohl für den Feststoff als auch für die Flüssigkeit aufgestellt. Für die prozessnahe Beschreibung von statischen Eindickern wird das Sedimentationsverhalten in Abhängigkeit der Feststoffkonzentration im Labormaßstab gemessen und daraus Short cut Modelle für die Sinkgeschwindigkeit abgeleitet [47].

Der Detailgrad der Modellierung von Prozesszentrifugen steigert sich im Vergleich zu statischen Eindickern und der Batch Zentrifugation deutlich. Der Grund ist im abweichenden Strömungsverhalten der betriebenen Apparate zu finden [48]. Die Hauptströmungsrichtung des Fluids ist nicht wie für Eindicker entgegengesetzt der Sedimentation, sondern in Richtung des vorhandenen Überlaufwehrs. Durch die wirkende Zentrifugalkraft wandern die Teilchen in radialer Richtung und werden gleichzeitig durch die Fluidströmung in Richtung Überlauf transportiert. Infolgedessen kommt es zu einer Querstromklassierung entlang des Rotors [49]. Das am IMVM entwickelte dynamische Prozessmodell gibt die Möglichkeit, Vorhersagen über die

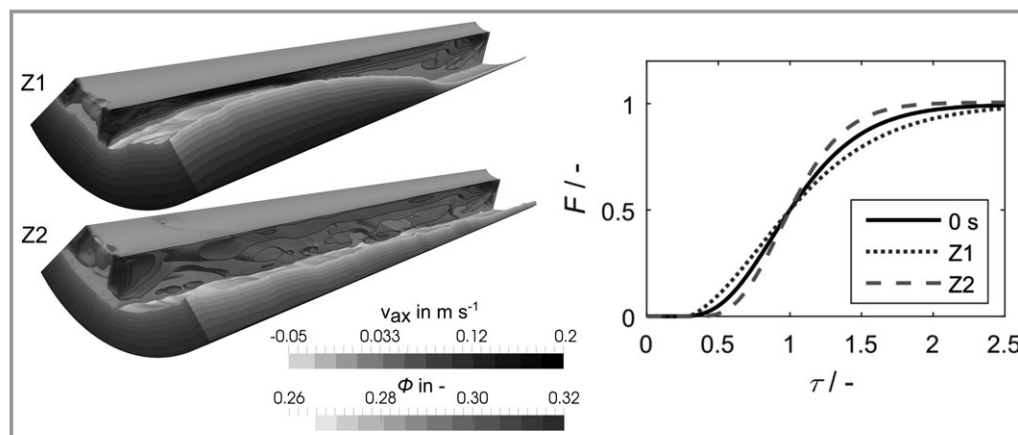


Abbildung 6. Links: Axiale Stromungsgeschwindigkeit v_{ax} und Sedimentverteilung entlang des Rotors unter Variation des Fließverhaltens. Fließverhalten Z1 entspricht einem schwerfließenden Sediment, Fließverhalten Z2 einem leichtfließenden. Rechts: Verweilzeitverteilung F der unterschiedlichen Zustände als Funktion der Durchströmungsziffer τ .

Trennleistung und das Entfeuchtungsverhalten unterschiedlicher Zentrifugen Typen und Baugrößen zu treffen. Ein Ersatzschaltbild kombiniert hier die Maschinenfunktion und die trenntechnischen Materialeigenschaften. Es sei angemerkt, dass die Maschinenfunktion das Verweilzeitverhalten beschreibt und sich aus Experimenten oder CFD Simulationen ergibt. Die trenntechnischen Materialeigenschaften bilden das Sedimentationsverhalten, den Kuchenbildungsprozess und den Sedimenttransport ab.

Abb.7 zeigt schematisch den Aufbau der dynamischen Prozessmodelle für Dekantier- und Röhrenzentrifugen. Bei den Prozesszentrifugen unterscheiden sich in erster Linie durch den Aufbau und das Prozessverhalten. In Dekantierzentrifugen bewegt sich der vorhandene Schneckenkörper mit einer Relativgeschwindigkeit zur Zentrifugentrommel und fördert das gebildete Haufwerk kontinuierlich aus dem Verfahrensraum [50]. In Röhrenzentrifugen hingegen ist keine Förderschnecke vorhanden und nach Erreichen des maximalen Füllgrads wird der Apparat heruntergefahren und entleert. Betrachtet man den Stand der Technik, stellt man fest, dass eine Reihe von Einflussgrößen, wie der Impulsaustausch zwischen Feststoff und Flüssigkeit, der Transport der flüssigen und dispersen Phase, die Haufwerksbildung und den Sedimenttransport, nicht berücksichtigt werden [25,26]. Dadurch ist ein Scale up nur in einem definierten Größenbereich und Parameterfeld unter

Berücksichtigung von einer Vielzahl von Versuchen im Pilot Maßstab möglich [27]. Eine weitere Schwierigkeit ist die Kopplung zwischen Strömungsbedingungen und trenntechnischem Materialverhalten. Hier führt die Haufwerksbildung zu einer Reduzierung des freien Strömungsquerschnitts und damit zu einer Verringerung der Verweilzeit im Trennapparat.

Der untere Teil in Abb.7 stellt den von Gleiss et al. [5] beschriebenen Bilanzraum Ansatz für die Schneckenabwicklung des zylindrischen Teils einer Gegenstrom Dekantierzentrifuge dar. Für die Berechnung wird der Strömungskanal entlang der Schneckenhelix in eine Sedimentations- und die Sedimentzone unterteilt und das Separationsverhalten, die Haufwerksbildung und der Sedimenttransport in Echtzeit berechnet [5]. Die Grundlage der mathematischen Modellierung bildet das Lösen von Massen- und Komponentenbilanzen für den Feststoff und die Flüssigkeit in Kombination mit Short cut Modellen für das Separationsverhalten und die Kuchenbildung. Weiterhin wird die Mengbilanz für jede Partikelgrößenklasse in den einzelnen Bilanzräumen gelöst.

Wie Beiser [51] und Gleiss et al. [5,52] beschreiben, ist die Trenngradfunktion ein Short cut Modell zur mathematischen Beschreibung der Klassierung in Dekantierzentrifugen. Beiser [51] geht in seinem Modell von einer axialen Kurzschlussströmung entlang der zylindrischen Trommel aus. Im Realbetrieb findet die Hauptströmungsrichtung in Dekantierzentrifugen entlang des Schneckenkanals statt. Gleiss et al. [5,52] leiten aus dieser Beobachtung den Trenngrad entlang der Schneckenabwicklung her. Der Trenngrad hängt dabei von der Zentrifugen Geometrie, den Prozessbedingungen und den Materialeigenschaften ab. Die Formulierung des Gleichungssystems liefert eine gewöhnliche Differentialgleichung 1. Ordnung, welche die zeitliche Änderung der Feststoffkonzentration im Apparat beschreibt [52]. Die Lösung des beschriebenen Gleichungssystems erfolgt numerisch mittels eines fünfstufigen Runge Kutta Verfahrens in der Softwareumgebung Matlab.

Im Gegensatz zum Stand der Technik wird außerdem der Sedimentaufbau und der Sedimenttransport bei der Berechnung von Dekantierzentrifugen berücksichtigt [4]. Das Lösen der Massenbilanz der Feststoffphase ergibt die Massenverteilung des Sediments entlang des Schneckenkanals. Das vorhandene Sediment führt zu einer Reduzierung des freien Strömungsquerschnitts. Im Gegensatz zum Stand der Technik erfolgt durch die Diskretisierung des Verfahrensraums die Berechnung der Feststoffkonzentration und der Partikelgrößenverteilung als lokal verteilte Größe. Für den Fall der dynamischen Simulation einer Röhrenzentrifuge werden die gleichen mathematischen Modelle unter Vernachlässigung des Sedimenttransports verwendet.

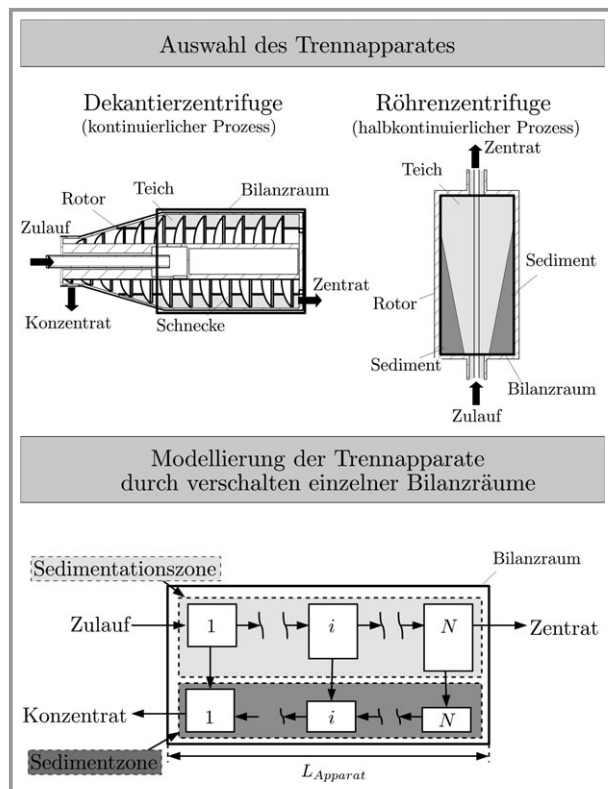


Abbildung 7. Schematische Darstellung des Bilanzraum Ansatzes für Röhrenzentrifugen bestehend aus der Sedimentations- und Sedimentzone.

5.1 Dynamische Simulationen auf der Makroskala am Beispiel zweier Zentrifugen-Typen

Abb. 8 zeigt den Vergleich von Experiment und dynamischer Simulation für den zeitlichen Verlauf des Abscheidegrads einer Röhrenzentrifuge im Technikumsmaßstab mit einem Gesamtvolumen von $V = 250$ mL. Im dargestellten Fall gilt für den Volumenstrom $Q_2 > Q_1$. Während des Anfahrvorgangs füllt sich die Maschine bis das Überlaufwehr erreicht wurde. Anschließend erfolgt der Austrag eines Teils der dispersen Phase über das Überlaufwehr und es kommt zu einem Abfall des Abscheidegrads. Im weiteren Verlauf sinkt die Verweilzeit durch den kontinuierlichen Sedimentaufbau in der Röhrenzentrifuge. Gegen Ende des betrachteten Zeitraums ist der Apparat fast vollständig mit Sediment gefüllt und der Abscheidegrad sinkt auf $A = 0$. Dies führt dazu, dass der zugeführte Feststoff die Röhrenzentrifuge vollständig verlässt und infolge der geringen Verweilzeit kein weiterer Feststoff akkumuliert. Beim freien Strömungsquerschnitt in der Röhrenzentrifuge handelt es sich um eine dünne Kreisringfläche nahe des Flüssigkeitsteichs in der hohen axialen Strömungsgeschwindigkeiten auftreten. Weiterhin zeigt sich, dass eine Erhöhung des Volumenstroms eine Veränderung der Gesamtprozesszeit und der Abscheideleistung herbeiführt. Abschließend lässt sich feststellen, dass das dynamische Modell den zeitlichen Verlauf des Abscheidegrads mit einer guten Genauigkeit abbildet.

Das dargestellte nicht lineare Prozessverhalten führt dazu, dass konventionelle PI Regler durch die Veränderung der Verweilzeit über die Gesamtprozessdauer an ihre Grenzen stoßen [53, 54]. In den meisten Fällen wird für diese Modelle aus der Sprungantwort eine Zeitkonstante abgeleitet. Diese Zeitkonstante ist jedoch für Röhrenzentrifugen nicht konstant, sondern eine Funktion der Zeit. Durch die zeitliche Änderung der Ausgangsgröße und des gezeigten nicht linearen Verhaltens ist eine Abschätzung der Zeitkonstante während des Betriebs nicht durchführbar. Eine Alternative zu konventionellen PI oder PID Reglern stellt die modellbasierte Regelung dar. Durch die Echtzeit Simulation mittels des mathematischen Modells ist es denkbar, den gezeigten numerischen Algorithmus in einen Ansatz zur modellbasierten Regelung einzubinden. Hierzu müssen die Feststoffkonzentration und die Partikelgrößenverteilung als Eingangs- und Ausgangsgrößen mittels geeigneter Prozessanalytik gemessen werden. Das dynamische Modell erlaubt es anschließend in Kombination mit den Messwerten den Separationsvorgang in der Röhrenzentrifuge vorzuberechnen und anschließend die Verweilzeit zum jeweiligen Zeitpunkt abzuleiten. Das Setzen eines Kriteriums für die Änderung des Ausgangssignals gestattet die Anpassung der Drehzahl oder des Volumenstroms über die Gesamtprozesszeit.

Die linke Seite in Abb. 9 zeigt den zeitlichen Verlauf der Feststoffkonzentration Φ am Zulauf

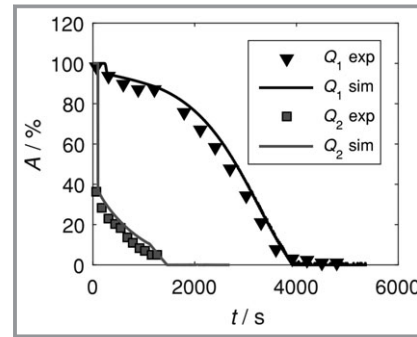


Abbildung 8. Zeitliche Verläufe des Abscheidegrads A während der Separation von Aerosil 200 in einer Röhrenzentrifuge für unterschiedliche Volumenströme Q . Vergleich der Echtzeit Simulationen mit experimentellen Daten von Spelter [55].

einer Dekantierzentrifuge im Labormaßstab. Die Feststoffkonzentration stellt im betrachteten Fall einen Eingabeparameter der dynamischen Simulation dar und ist als zeitabhängige Größe am Zulauf definiert. Im für die numerische Studie vorgegebenen Fall kommt es nach einer Zeit von $t = 500$ s zu einem linearen Anstieg der Feststoffkonzentration, bis sich der Verlauf nach einer Zeit von $t = 800$ s nicht mehr ändert. Schwankungen der Feststoffkonzentration am Zulauf können im Realbetrieb durch Produktschwankungen im Partikelbildungsprozess entstehen.

Auf der rechten Seite in Abb. 9 ist der zeitliche Verlauf des Abscheidegrads A sowie des Zulaufvolumenstroms Q für den nicht geregelten und den geregelten Fall dargestellt. Dabei findet bei den eingestellten Anfangsbedingungen eine vollständige Klärung der Suspension statt und der Abscheidegrad beträgt $A = 100$ %. Infolge der Änderung der Feststoffkonzentration am Zulauf ergibt sich eine Änderung der trenntechnischen Materialeigenschaften in der Dekantierzentrifuge. Konkret bedeutet dies, dass der Einfluss hydrodynamischer Wechselwirkungen zwischen disperser Phase und Flüssigkeit ansteigt. Also Folge kommt es zu einer Verringerung der Sinkgeschwindigkeit und bei konstanten Prozessbedingungen strömt mehr Feststoffmasse am Zulauf in die Zentrifuge. Als Ergebnis steigt der volumetrische Füll

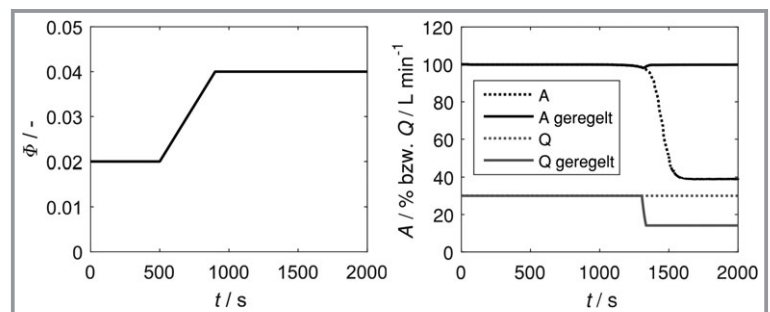


Abbildung 9. Numerische Studie zum zeitlichen Verlauf des Abscheidegrads A in einer Gegenstrom Dekantierzentrifuge. Links: Eingangssignal der Feststoffkonzentration Φ . Rechts: Abscheidegrad A und nicht geregelter und geregelter Volumenstrom Q als Funktion der Zeit t nach linearer Erhöhung der Feststoffkonzentration [52].

grad über die Zeit an. Durch die Änderung der trenntechnischen Eigenschaften tritt nicht sofort eine Reaktion der Maschine auf diesen Lastwechsel ein. Im nicht geregelten Fall ist die Reaktion erst nach einer Zeit von $t = 1300$ s sichtbar. Als Grund kann hier die Verschiebung des Verhältnisses aus Sedimentationszeit und Verweilzeit in Richtung kleinerer Verweilzeiten durch den Sedimentaufbau genannt werden. Als Folge kommt es bei konstanten Prozessbedingungen zu einem erhöhten Produktaustrag, was im Falle der vollständigen Klärung der Maschine nicht erwünscht ist.

Das dynamische Modell beschreibt die Prozessbedingungen und die Materialeigenschaften am Zulauf als zeitabhängige Größen. So wurde für den geregelten Fall das Ausgangssignal mit der Zeit aufgezeichnet und nach Erreichen eines kritischen Wertes der Volumenstrom so angepasst, dass keine Verschlechterung während der Klärung der Suspension eintritt. Für den geregelten Fall verringert das dynamische Modell daher schrittweise den Volumenstrom, was einen Anstieg der Verweilzeit der Suspension in der betrachteten Dekantierzentrifuge zur Folge hat. Als Ergebnis bleibt der Abscheidegrad näherungsweise konstant und ein effizienter Betrieb bei vollständiger Klärung ist gewährleistet.

Zusammenfassend zeigt sich bei der Betrachtung des Separationsvorgangs für beide beschriebenen Zentrifugen Typen, dass ein deutlich voneinander abweichendes Prozessverhalten vorhanden ist. Konventionelle stationäre Modelle, die den Stand der Technik darstellen, erlauben keine zeitabhängige Berechnung des Separationsvorgangs. Dies ist jedoch für die Vorhersage von Lastwechseln zwingend erforderlich. Ein weiterer Vorteil des Ansatzes ist die orts- und zeitaufgelöste Betrachtung des Separationsvorgangs für die beschriebenen Zentrifugen Typen und die Durchführung von Sensitivitätsanalysen. Dadurch wird es möglich, den Einfluss unterschiedlicher Parameter am Rechner vorherzusagen, um so einerseits ein besseres Prozessverständnis aufzubauen und andererseits dieses Wissen für die gezielte Schulung neuer Mitarbeiter einzusetzen. Durch die Verknüpfung dieser Ansätze mit künstlicher Intelligenz ist es weiterhin denkbar, selbstlernende Regler aufzubauen, die datenbasiert gemessene Größen aus dem Prozess ableiten und damit die modellbasierte Regelung gezielt unterstützen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag zeigt die skalenübergreifende mathematische Modellierung der Zentrifugation als Trennschritt in der Fest/Flüssig Trennung exemplarisch am Beispiel von Röhren- und Dekantierzentrifugen. Beim Überblick über mögliche Einflussgrößen ergibt sich ein vielfältiges Parameterefeld, das von den Eigenschaften der dispersen und kontinuierlichen Phase abhängt. Mögliche Einflussparameter sind die Partikelgröße, die Partikelform oder die physikochemischen Eigenschaften.

Die mathematische Modellierung der Strömungsvorgänge mittels aufgelöster CFD Simulation in Kombination mit dem Fließverhalten der Suspension und des flüssigkeitsgesättigten Haufwerks erlaubt die Beschreibung der komplexen Wechselwirkungen zwischen Flüssigkeit und Feststoff. Zur Berücksichtigung des Strömungsverhaltens auf der Prozessebene wurde eine Modellreduktion durchgeführt und ein Short cut Modell zur Beschreibung des Verweilzeitverhaltens abgeleitet. Zur Echtzeit Simulation der mechanischen Flüssigkeitsabtrennung in Prozesszentrifugen wird das Verweilzeitverhalten mittels eines Ersatzschaltbildes modelliert und mit den trenntechnischen Materialeigenschaften der Sedimentation, der Kuchenbildung und des Feststofftransports verknüpft. Dabei zeigt sich für Dekantier- und Röhrenzentrifugen ein abweichendes Prozessverhalten. Während sich für Dekantierzentrifugen nach der Anfahrphase ein stationärer Zustand einstellt, kommt es für Röhrenzentrifugen zu einer kontinuierlichen Änderung der Strömungsbedingungen und der trenntechnischen Materialeigenschaften.

Für zukünftige Arbeiten ergeben sich eine Reihe von Fragestellungen. So fehlt es an Online- oder In situ Messverfahren, um nanoskalige Partikelsysteme während des Separationsvorgangs mit ausreichender Genauigkeit messen zu können. Dies ist jedoch eine wichtige Voraussetzung bei der Entwicklung von Algorithmen zur modellbasierten Regelung und numerischen Optimierung des Trennschritts der Zentrifugation. Weiterhin fehlt es an Short cut Modellen, welche die Sedimentation, den Sedimentaufbau und das Fließverhalten in Abhängigkeit der Partikelgrößenverteilung und physikochemischen Eigenschaften darstellen. Dies ist jedoch eine wichtige Voraussetzung, um den experimentellen Aufwand bei der Analyse im Labor- und Pilotmaßstab gering zu halten. Außerdem fehlt es an numerischen Algorithmen, die eine Regelung des Prozesses ausgehend von Online- und In situ Messungen in Kombination mit Echtzeit Simulationen erlauben. Die Kombination der einzelnen, beschriebenen Punkte würde es in einem weiteren Schritt erlauben einen *digital twin* (digitales Abbild) für den Trennschritt der Zentrifugation zu erstellen und so einen automatischen und sicheren Betrieb in der Prozessindustrie zu gewährleisten.

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Schwerpunktprogramm SPP1679 „Dynamischen Simulation vernetzter Feststoffprozesse DynSim FP“ (NI 414/21). Weiterhin bedanken sich die Autoren bei der Allianz Industrie und Forschung für die finanzielle Unterstützung in den IGF Vorhaben 18461N und 19528N.

Simon Hammerich absolvierte bis 2013 den Diplomstudiengang Bioingenieurwesen am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Seit Ende 2013 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik am KIT in der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Ing. habil. Hermann Nirschl. Im Zuge seiner

Promotion beschäftigt er sich seit 2014 mit der numerischen Simulation von Separationsprozessen in Vollmantelzentrifugen und der Charakterisierung des Fließverhaltens gesättigter Haufwerke.

Marco Gleiß studierte Verfahrenstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und promovierte 2018 am Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik des KIT zum Thema der Dynamischen Modellierung von Vollmantelzentrifugen. Seit 2018 arbeitet er als Post Doc in der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Ing. habil.

Hermann Nirschl und beschäftigt sich mit der numerischen Simulation, der modellbasierten Regelung, der dynamischen Fließschemasimulation sowie der Entwicklung von Analysemethoden zur Messung von Partikeleigenschaften im Bereich der mechanischen Flüssigkeitsabtrennung.

Hermann Nirschl promovierte 1994 im Bereich der Fluidodynamik an der Technischen Universität München. Bis 1997 habilitierte er im Bereich der numerischen Simulation von partikelbeladenen Strömungen. Von 1997 bis 2002 war er Leiter der Verfahrenstechnik im Bereich der Dentalsparte der Firma 3M und fungierte als Projektmana-

ger für verschiedenste Projekte in München und St. Paul/Minnesota. Seit 2003 ist er Professor für Mechanische Verfahrenstechnik am Karlsruher Institut für Technologie. Der Fokus seiner Forschung liegt im Bereich der Partikeltechnik mit dem Schwerpunkt auf Separationsprozesse, numerischen Simulationen und der Entwicklung von Methoden und Geräten zur Partikelanalyse.

Formelzeichen

A	[]	Abscheidegrad
F	[]	Verweilzeitverteilung
k	[]	Anpassungsfunktion
m	[kg]	Masse
\dot{m}	[kg s ⁻¹]	Massenstrom
Q	[m ³ s ⁻¹]	Volumenstrom
r	[m]	Radius
t	[s]	Zeit
v	[m s ⁻¹]	Geschwindigkeit
x	[]	Partikeldurchmesser

Griechische Symbole

η	[Pa s]	dynamische Viskosität
ρ	[kg m ⁻³]	Dichte
τ	[]	Durchströmungsziffer
Φ	[]	Feststoffvolumenanteil
ω	[s ⁻¹]	Winkelgeschwindigkeit

Indizes und Superskripte

ax	axial
f	Flüssigkeit
kor	korrigiert
s	Feststoff
sep	Separation

Abkürzungen

CFD	numerische Strömungssimulationen
CSTR	kontinuierlicher Rührreaktor
PFR	Pfropfenstromreaktor
SQP	sequential quadratic programming

Literatur

- [1] J. Zhou, *Adv. Manuf.* **2013**, *1*, 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40436-013-0006-5>
- [2] M. Dosta, S. Antonyuk, E. U. Hartge, S. Heinrich, *Chem. Ing. Tech.* **2014**, *86*, 1073–1079. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.201400021>
- [3] N. Asprión, M. Bortz, *Chem. Ing. Tech.* **2018**, *90*, 1727–1738. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.201800051>
- [4] M. Gleiss, H. Nirschl, *Chem. Eng. Technol.* **2015**, *38*, 1873–1882. DOI: <https://doi.org/10.1002/ceat.201500037>
- [5] M. Gleiss, S. Hammerich, M. Kespe, H. Nirschl, *Chem. Eng. Sci.* **2017**, *163*, 167–178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.01.046>
- [6] S. Wright, J. Nocedal, *Numerical Optimization*, Springer, New York **1999**.
- [7] V. Skorych, M. Dosta, E. U. Hartge, S. Heinrich, *Powder Technol.* **2017**, *314*, 665–679. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.061>
- [8] A. Erk, *Rheologische Eigenschaften feindisperser Suspensionen in Filtern und Zentrifugen*, Ph.D. Thesis, Universität Karlsruhe (TH) **2006**.
- [9] M. Stieß, *Mechanische Verfahrenstechnik Partikeltechnologie 1*, Springer Verlag, Berlin **2008**.
- [10] C. Bernhardt, *Klassier und Sedimentationsmethoden*, Wiley VCH, Weinheim **1991**.
- [11] H. Nirschl, *Chem. Ing. Tech.* **2007**, *79*, 1797–1807. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.200700107>
- [12] F. Löffler, *Staubabscheiden*, Thieme, Stuttgart **1988**.
- [13] J. Draxler, M. Siebenhofer, *Verfahrenstechnik in Beispielen*, Springer Vieweg, Wiesbaden **2014**.
- [14] J. F. Richardson, W. N. Zaki, *Chem. Eng. Res. Des.* **1997**, *75*, 82–100.
- [15] S. Stahl, L. E. Spelter, H. Nirschl, *Chem. Eng. Technol.* **2008**, *31*, 1577–1583. DOI: <https://doi.org/10.1002/ceat.200800300>
- [16] T. Mladenchev, *Modellierung des Filtrations- und Fließverhaltens von ultrafeinen, kompressiblen, flüssigkeitsgesättigten Partikelpackungen*, Ph.D. Thesis, Otto von Guericke Universität Magdeburg **2007**.
- [17] A. Erk, H. Anlauf, W. Stahl, *Chem. Ing. Tech.* **2004**, *76*, 1494–1499.
- [18] B. Erk, A. Luda, *Chem. Ing. Tech.* **2003**, *75*, 1250–1254. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.200303260>
- [19] R. H. Müller, G. E. Hildebrand, *Zetapotential und Partikelladung in der Laborpraxis*, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart **1996**.
- [20] M. Beiser, G. Bickert, P. Scharfer, *Chem. Eng. Technol.* **2004**, *27*, 1084–1088. DOI: <https://doi.org/10.1002/ceat.200403252>
- [21] T. Mladenchev, J. Tomas, *Chem. Ing. Tech.* **2004**, *76*, 1814–1818.
- [22] A. Tiselius, *Kolloid Z.* **1932**, *59*, 306–309.
- [23] H. Reuter, *Chem. Ing. Tech.* **1967**, *39*, 311–318.
- [24] W. Gösele, *Chem. Ing. Tech.* **1974**, *46*, 67.
- [25] C. M. Ambler, *Chem. Eng. Prog.* **1952**, *48*, 150–158.
- [26] C. M. Ambler, *J. Microb. Biochem. Technol.* **1959**, *1*, 185–205. DOI: <https://doi.org/10.1002/jbmt.390010206>
- [27] C. M. Ambler, *Ind. Eng. Chem. Res.* **1961**, *48*, 430–433. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie50618a021>
- [28] E. B. Nauman, *Ind. Eng. Chem. Res.* **2008**, *47*, 3752–3766.
- [29] E. B. Nauman, B. A. Buffham, *Mixing in continuous flow systems*, John Wiley & Sons, New York **1983**.
- [30] D. Mewes, *Chem. Ing. Tech.* **1986**, *58*, 260.
- [31] W. Pippel, *Verweilzeitanalyse in technologischen Strömungssystemen*, Akademie Verlag, Berlin **1978**.
- [32] M. Baerns, H. Hofmann, A. Renken, *Chemische Reaktionstechnik*, Wiley VCH, Weinheim **2004**.
- [33] B. Platzer, K. Steffani, S. Große, *Chem. Ing. Tech.* **1999**, *71*, 795–807.
- [34] A. Paschedag, *CFD in der Verfahrenstechnik*, Wiley VCH, Weinheim **2004**.
- [35] M. Breitling, U. Janoske, M. Piesche, *Chem. Ing. Tech.* **2003**, *75*, 184–188.
- [36] C. Pang, W. Tan, E. Sha, Y. Tao, L. Liu, *Chem. Sci. Eng.* **2012**, *6*, 329–338. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11705-012-1205-5>
- [37] X. Romání Fernández, H. Nirschl, *Chem. Eng. Technol.* **2009**, *32*, 719–725.
- [38] R. Bürger, F. Concha, *Int. J. Miner. Process.* **1999**, *55*, 267–282.
- [39] S. Hammerich, M. Gleiß, M. Kespe, H. Nirschl, *Chem. Eng. Technol.* **2018**, *41*, 44–50. DOI: <https://doi.org/10.1002/ceat.201700104>
- [40] J. Ferry, S. Balachandar, *Int. J. Multiphase Flow* **2001**, *27*, 1199–1226.
- [41] G. J. Kynch, *Trans. Faraday Soc.* **1952**, *48*, 166. DOI: <https://doi.org/10.1039/tf9524800166>
- [42] P. Garrido, R. Bürger, F. Concha, *Int. J. Miner. Process.* **2000**, *60*, 213–227. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(00\)00014-4](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(00)00014-4)
- [43] R. Bürger, F. Concha, *Int. J. Miner. Process.* **2001**, *63*, 115–145. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(01\)00038-2](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(01)00038-2)
- [44] A. D. Stickland, L. R. White, P. J. Scales, *AIChE J.* **2006**, *52*, 1351–1362. DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.10746>
- [45] I. Takacs, G. Patry, D. Nolasco, *Water Res.* **1991**, *25*, 1263–1271.
- [46] Y. Zheng, D. M. Bagley, *J. Environ. Eng.* **1998**, *124*, 953–958.
- [47] B. Li, M. K. Stenstrom, *Water Res.* **2014**, *65*, 40–63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.07.007>
- [48] L. E. Spelter, H. Nirschl, A. D. Stickland, P. J. Scales, *AIChE J.* **2013**, *59*, 3843–3855. DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.14115>
- [49] W. Stahl, *Fest Flüssig Trennung Band II: Industrie Zentrifugen, Maschinen und Verfahrenstechnik*, DRM Press, Mannedorf **2004**.
- [50] W. Langeloh, T. Stahl, *Aufbereitungstechnik* **1989**, *31*, 331–337.
- [51] M. Beiser, *Sedimentation submikroner Partikel in Abhängigkeit physikalischer chemischer Einflüsse und ihr Separationsverhalten in Dekantierzentrifugen*, Ph.D. Thesis, Universität Karlsruhe (TH) **2006**.
- [52] M. Gleiss, S. Hammerich, M. Kespe, H. Nirschl, *Chem. Eng. Technol.* **2018**, *41*, 19–26. DOI: <https://doi.org/10.1002/ceat.201700113>
- [53] M. Konrath, *Klassierung von Feinstpartikeln mittels schnell drehender Sedimentationszentrifugen*, Ph.D. Thesis, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) **2016**.
- [54] M. Konrath, M. Hackbarth, H. Nirschl, *Adv. Powder Technol.* **2014**, *25*, 991–998. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2014.01.022>
- [55] L. Spelter, *Abtrennung und Klassierung kolloidaler Partikel in Zentrifugen: Experimenteller Nachweis und Modellierung der Sedimentation in halbkontinuierlichen Vollmantelzentrifugen*, Ph.D. Thesis, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) **2012**.

Repository KITopen

Dies ist ein Postprint/begutachtetes Manuskript.

Empfohlene Zitierung:

Hammerich, S.; Gleiß, M.; Nirschl, H.
[Modellierung und Simulation von Vollmantelzentrifugen als ein Aspekt der voranschreitenden Digitalisierung in der Fest/Flüssig-Trennung.](#)
2019. Chemie - Ingenieur - Technik, 91.
doi: [10.5445/IR/1000097072](#)

Zitierung der Originalveröffentlichung:

Hammerich, S.; Gleiß, M.; Nirschl, H.
[Modellierung und Simulation von Vollmantelzentrifugen als ein Aspekt der voranschreitenden Digitalisierung in der Fest/Flüssig-Trennung.](#)
2019. Chemie - Ingenieur - Technik, 91 (3), 215–227.
doi: [10.1002/cite.201800098](#)

Lizenzinformationen: [KITopen-Lizenz](#)