

# **Experimentelle Untersuchung und Modellierung von Koaleszenz und Agglomeration für die Sprühtrocknung von Suspensionen**

Fortsetzungsantrag eingereicht an die

**Deutsche Forschungsgemeinschaft  
Kennedyallee 40, 53170 Bonn**

im Rahmen des Schwerpunktprogramms

## **Herstellen funktionaler Feststoffpartikeln in Sprühverfahren – Von den Anforderungen an das Pulver und an seine Eigenschaften zum geeigneten Prozess SPP 1423**

Projektbeginn:	01. Mai 2009
Projektdauer:	6 Jahre
Antragszeitraum:	2. Förderperiode (2 Jahre)
Antragsteller und Projektleiter:	Prof. Dr.-Ing. M. Sommerfeld
Projektbearbeiter:	Dipl.-Ing. M. Kuschel

Mechanische Verfahrenstechnik  
Zentrum für Ingenieurwissenschaften  
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
06099 Halle (Saale)

## **1 Allgemeine Angaben**

Antrag auf Gewährung einer Sachbeihilfe

(Fortsetzungsantrag, bisheriges Förderkennzeichen SO 204/35-1)

### **1.1 Antragsteller**

Name:	Martin Sommerfeld, Prof. Dr.-Ing.
Dienststellung:	Universitätsprofessor
Geburtsdatum:	21. April 1953
Staatsangehörigkeit:	deutsch
Institution:	Institut für Verfahrenstechnik
Fachbereich Ingenieurwissenschaften	
	Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
	06099 Halle (Saale)
Diensttelefon (Durchwahl):	03461/462879
Telefax:	03461/462878
e-mail:	martin.sommerfeld@iw.uni-halle.de
Privatadresse:	Herzog-Heinrich-Weg 1
	06246 Bad Lauchstädt
Privattelefon:	034635/21899

### **1.2 Thema**

Experimentelle Untersuchung und Modellierung von Koaleszenz und Agglomeration für die Sprühtrocknung von Suspensionen

### **1.3 Fach- und Arbeitsrichtung**

Fachrichtung:	Mechanische Verfahrenstechnik
Arbeitsrichtung:	Strömungsmechanik, Mehrphasenströmungen, numerische Simulation

### **1.4 Voraussichtliche Gesamtdauer**

Voraussichtliche Gesamtdauer:	6 Jahre
Beginn des Vorhabens:	01. Mai 2009
Beginn der DFG-Förderung:	01. Mai 2009
Ende der benötigten Förderung:	01. Mai 2015

### **1.5 Antragszeitraum**

Antragszeitraum:	01. Mai 2011 - 30. April 2013 (2 Jahre)
Datum der bisherigen Bewilligung:	25. Februar 2009
Die Personalmittel reichen voraussichtlich	bis 30. April 2011
Die Sachmittel reichen voraussichtlich	bis 30. April 2011

## **1.6 Zusammenfassung**

Das Primärziel des Forschungsvorhabens liegt in der Modellbildung zur Abgrenzung der Kollisionsregime für oberflächenspannungsdominierte Lösungs- und Suspensionstropfen als auch der Modellierung der Agglomeration von viskositätsdominierten Tropfen. Diese Modelle werden in einen Euler/Lagrange Ansatz implementiert, um schließlich Sprühtrocknungsprozesse und die Eigenschaften der entstehenden Produkte vorherzusagen.

Dazu werden die elementaren Mechanismen, die die Kollision von Tropfen in Sprühtrocknern maßgeblich beeinflussen experimentell analysiert. Der wichtigste Parameter im beantragten Projekt ist der Feststoffgehalt (bzw. Trocknungsgrad) respektive die daraus resultierende Viskosität auf den Ausgang eines Kollisionsergebnisses. Bisher konnte ein Bereich bis etwa 80 mPas für unterschiedliche Stoffsysteme untersucht werden. In der folgenden Projektphase soll dieser Bereich auf 1 Pas durch eine Neuentwicklung eines Düsensystems in Zusammenarbeit mit der Firma Inducap ausgedehnt werden. Mit dieser Anlage wird es möglich, das Eindringen von kollidierenden Tropfen verschiedener Viskosität mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitskameras zu erfassen.

Die zu entwickelnden Modelle sollen den Ausgang der Kollision von Tropfen unterschiedlichen Feststoffgehalts (Viskosität) vorhersagen und basieren auf der Betrachtung von oberflächenspannungs- und viskositätsdominierten Tropfen.

Anschließend soll das Modell unter realen Bedingungen validiert werden, indem die eigens dafür errichtete Flachstrahlanlage zur Sprühtrocknung und zur Produktion von Agglomeraten eingesetzt wird. In dieser Anlage befinden sich zwei wechselwirkende Flachstahl-Sprühnebel, wo es verstärkt zu Tropfenkollisionen kommt. Diese werden wiederum mit Hochgeschwindigkeitskameras erfasst und die Struktur der entstandenen Agglomerate wird analysiert.

## **2 Stand der Forschung, eigene Vorarbeiten**

### **2.1 Arbeitsbericht**

Bei der Sprühtrocknung werden die verschiedensten Zerstäubungsarten eingesetzt, um gezielt ein bestimmtes Tropfengrößenspektrum einstellen zu können. Im Nahbereich des Zerstäubers ist die Kollisionshäufigkeit hoch und es kann zu Koaleszenzeffekten, aber auch zur Erzeugung von Sekundärtropfen aufgrund von Separationsprozessen kommen. Diese Effekte modifizieren das Tropfenspektrum und damit letztlich auch die Produkteigenschaften. Für die Modellierung der Kollision von Lösungs- bzw. Suspensionstropfen fehlen allerdings die dafür notwendigen Daten. Zwar existieren bereits umfangreiche Arbeiten zur Untersuchung von Tropfenkollisionen, jedoch nur für einfache Flüssigkeiten, wie Wasser, kurzkettige Alkohole oder Alkane [1,2,3,4,5,7]. Komplexere Flüssigkeiten, die bisher kaum Beachtung fanden außer bei [6], können entweder eine wässrige Polymerlösung oder eine

Suspension sein. Auf sie wird, wie bereits im Erstantrag erwähnt, der Fokus gerichtet. Hieraus ergibt sich, dass durch die Variation des Feststoffanteils die Viskosität gezielt eingestellt und dadurch der Einfluss der Viskosität systematisch untersucht werden kann. Die ausgewählten Substanzen für die Analyse sind die beiden Modellsysteme Polyvinylpyrrolidon und Kieselsäure der BASF bzw. von Evonik.

Im Rahmen dieses Projektes sollen jene physikalischen Vorgänge untersucht werden, die bei Tropfenkollisionen zusammen wirken. Dabei wird das Augenmerk auf komplex rheologische Flüssigkeiten, wie feststoffhaltige Lösungen oder Suspensionen gelegt und der Einfluss des Feststoffgehalts bzw. der Viskosität auf das Kollisionsergebnis untersucht, um ein allgemeingültiges Modell zur Unterteilung der Ergebnisse zu erstellen. In Tabelle 2.1 sind das für die erste Projektphase vorgesehene Arbeitsprogramm und der Bearbeitungsstatus zusammengefasst. Darauf folgend werden die wichtigsten Ergebnisse der ersten Projektphase vorgestellt und diskutiert.

Tabelle 2.1: Geplante Arbeitspakete für die erste Projektphase

Arbeitsschritt	Status
Neukonzeption und Umsetzung des Auswertungsprogramm	abgeschlossen
Umbau der Tropfenanlage für Hochgeschwindigkeitsaufn.	abgeschlossen
Schaffung einer Datenbasis von 12 Stoffsystemen	abgeschlossen
Modellbildung zur Unterscheidung der Kollisionsregime	Konzept erstellt, Ansätze erarbeitet, weitere Bearbeitung in 2. Phase
Inbetriebnahme und Experimente mit Flachstrahlanlage	bis Ende 1. Phase abgeschlossen
Messung der Strömung mittels PDA	Erste Aufnahmen getätigt, bis Ende 1. Phase abgeschlossen

### Versuchsordnung

Die Entwicklung und Validierung eines Modells, das den Einfluss des Feststoffgehalts oder der Viskosität parametrisiert, erfordert eine ausreichende Datenbasis, die bisher nicht gegeben war. Deshalb wurden umfangreiche Untersuchungen angestellt, um diese Basis zur Charakterisierung des Einflusses des Feststoffgehalts auf das Kollisionsergebnis von Tropfen zu schaffen. Die wässrige Polymerlösung Polyvinylpyrrolidon (PVP) wurde mit unterschiedlichen Massenanteilen und Polymersierungsgrad untersucht. Kieselsäure konnte aufgrund der experimentellen Gegebenheiten bisher nicht untersucht werden. Zum einen sedimentierte die Kieselsäure in den Transportleitungen, was zu einer Verringerung des Massenanteils führte und zum anderen konnte eine Anregung des Strahls nicht zufrieden stellend realisiert werden.

Prinzipiell unterscheiden sich beide Substanzen hinsichtlich der Art des Fluids. Während PVP mit Wasser eine newtonsche Lösung (für kleine K-zahlen) bildet, kann sich die Kieselsäure nicht in Wasser auflösen und man erhält eine nicht-newtonsche Suspension.

Das Vorhandensein des Feststoffes hat eine beträchtliche Veränderung der Kollisionsergebnisse zur Folge. Dieser Einfluss soll im Projekt quantifiziert werden. Die folgende Tabelle (Tab. 2.2) zeigt die bisher untersuchten Stoffsysteme. Kieselsäure mit unterschiedlichen Feststoffgehalten kann erst mit der neuen Anlage in der zweiten Projektphase gemessen werden, weil, anders als beim jetzigen Verfahren, der Strahl von einem Kolben aktiv zerschlagen wird.

Tabelle 2.2: Untersuchte Stoffsysteme

Stoff	Feststoffanteil in Ma.%					
	-	-	-	-	-	-
Wasser	-	-	-	-	-	-
PVP- K17	5	10	20	30	35	
PVP- K30	5	10	15	20	23	25
Kieselsäure	Bisher nicht möglich					

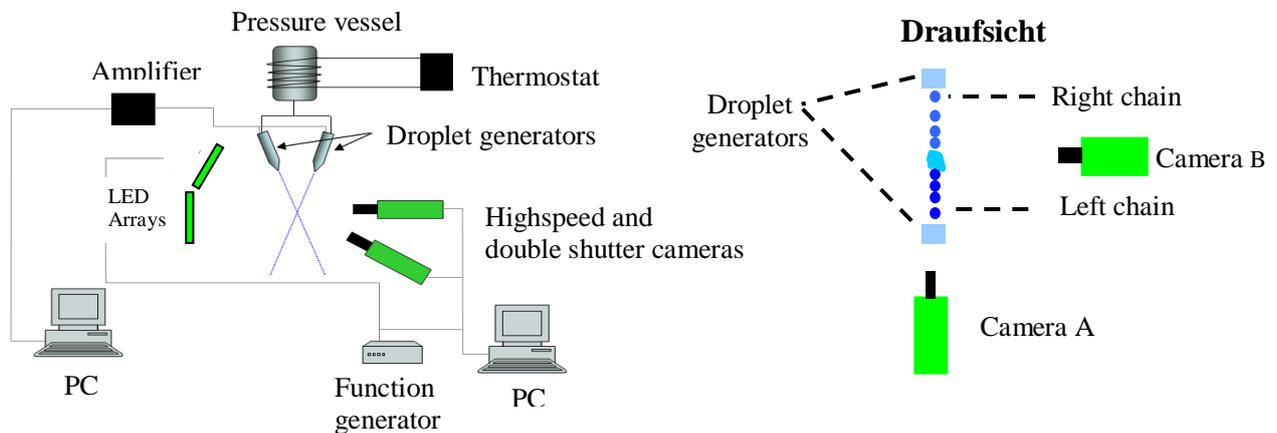


Abbildung 1: links: Experimenteller Aufbau der Binärdropfenanlage; rechts: Draufsicht auf die experimentelle Anordnung

Für die Experimente wurden zwei Tropfengeneratoren (Fa. encap biosystems) eingesetzt, welche durch piezoelektrische Anregung nahezu monodisperse Tropfen erzeugen. Hierfür wird die Flüssigkeit durch Düsen mit einem Durchmesser von 200  $\mu\text{m}$  gedrückt. Die Temperatur des Fluides wurde mit Hilfe eines Thermostats auf 22  $^{\circ}\text{C}$  konstant gehalten.

Die Düsen sind so gegeneinander ausgerichtet, dass sich die Tropfen im Kollisionspunkt in exakt einer Ebene treffen (Abb. 1 rechts). In den zueinander orthogonal stehenden Beobachtungsebenen wurde jeweils eine CCD-Kamera angebracht, um das Kollisionsereignis und dessen Verlauf aufzunehmen.

Eine Hintergrundbeleuchtung wurde mit Hilfe von zwei LED-Feldern realisiert. Der Flug der Tropfen und die Kollision eines Tropfenpaares wurden mit einer Hochgeschwindigkeitskamera der Firma PCO (Typ 1200 HS) bei einer Bildrate von etwa 6000 Bildern/s zeitlich aufgelöst, wodurch jedem Tropfenpaar das Kollisionsergebnis exakt zugeordnet werden konnte. Zudem konnte die Verformung der Tropfen und die Ausbildung von Satellitentröpfchen erfasst werden. Die orthogonal dazu platzierte CCD-Kamera war eine

PCO Sensicam, die im Doppelbildmodus arbeitete.

### **Neukonzeption des Auswertungsprogramms**

Im Verlauf der ersten Förderperiode hat sich herausgestellt, dass für das vorhandene Auswertungsprogramm eine Neukonzeption notwendig war, weil die gewählte Art der Bildaufzeichnung völlig andere Strategien bei der Auswertung forderten, die die Implementierung einer Vielzahl von neuen Funktionen nach sich zogen. Die größten Änderungen des Programms bestehen darin, dass nun jeder Einzeltropfen bis zum Kollisionspunkt separat und gerichtet verfolgt wird und dass das Kriterium für die Identifikation der Tropfen erweitert wurde. Der Vorteil, der sich aus einer Einzeltropfenverfolgung ergibt, besteht darin, dass die Bilder nicht aufwendig rekonstruiert werden müssen [1, 2, 3], sondern das Ergebnis direkt von dem jeweiligen Tropfenpaar erfasst werden kann. Dem Verfolgen der Tropfen liegt ein Algorithmus zur Erkennung der Tropfenkontur zu Grunde. Dieser verarbeitet die Rohbilder, indem zunächst ein Gradientenfilter und anschließend ein Binärfilter angewendet werden. Danach werden die scharfen Konturen der Tropfen detektiert und in Positionen umgewandelt. Anhand der Positionen der Konturpunkte können dann die Mittelpunkte eines jeden Tropfens bestimmt werden.

In den Experimenten fliegen die Tropfen, wenn der Strahl richtig angeregt wird, im Beobachtungsbereich auf einer Geraden, die mit Hilfe der Tropfenschwerpunkte beschrieben werden kann. Bei der Bestimmung der Tropfengeschwindigkeit durch die Bildverarbeitungssoftware zeigt sich aber, dass die Geschwindigkeitsvektoren leicht in ihrer Richtung variieren (siehe Abb. 2), was eine Verschiebung bzw. eine Streuung des Kollisionpunktes und eine damit verbundene Streuung des Auftreffwinkels bei ein und derselben Experimentanordnung hervorrufen würde. Tatsächlich ist der Kollisionspunkt sehr konstant an einer Stelle, weshalb eine Korrektur der Flugrichtung eines einzelnen Tropfens in eine gemeinsame Flugrichtung sinnvoll ist. Hierfür wird eine lineare Regression aller Tropfenschwerpunkte durchgeführt. Anschließend wird dieser Richtungsvektor normiert und mit dem jeweiligen Geschwindigkeitsvektor multipliziert. Man erhält daraus einen Tropfen, der sich entlang der mittleren Flugrichtung entsprechend seiner Geschwindigkeit fortbewegt. Nun können die Tropfen bis in den Kollisionspunkt verschoben werden und der Auftreffwinkel, die Relativgeschwindigkeit und weitere wichtige Parameter bestimmt werden. Der zweite wichtige Aspekt im Programm resultiert aus der Einzelverfolgung der Tropfen, nämlich die Zuordnung von Tropfen zwischen zwei Bildern. Hierfür muss ein klares Kriterium existieren, das denselben Tropfen auf zwei Bildern exakt zuordnet. Das „**Particle Tracking Velocimetry** -Kriterium“ hat sich als Standard etabliert. Es fordert, dass sich ein Tropfen zwischen zwei Bildern nur soweit bewegen darf, dass eine Überlappungsfläche entsteht, wenn die zwei Bilder übereinander gelegt werden.

Dieses Kriterium ist auch die Grundlage für das hier entwickelte „erweiterte PTV- Kriterium“ (Abb. 3), was bei gerichteten und verdünnten Strömungen, wie es bei den Tropfenketten üblich ist, eingesetzt werden kann. Hierbei wird eine größere Zeitverschiebung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bildern zugelassen. Die oben beschriebene mittlere Flugrichtung wird verwendet, um die Tropfen diskret in Bewegungsrichtung zu verschieben. Nach einer bestimmten Verschiebung wird das ursprüngliche PTV-Kriterium (Überlappungszone zweier Tropfen) wieder angewendet.

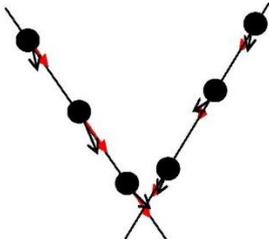


Abbildung 3: korrigierte Flugrichtung der Tropfen

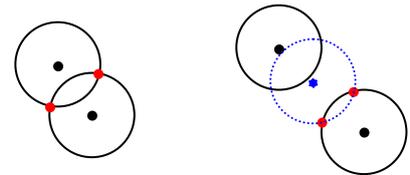


Abbildung 2: links: Standard PTV Kriterium; rechts: erweitertes PTV Kriterium, blau gepunktet ist der verschobene Tropfen aus dem ersten der zwei Doppelbilder

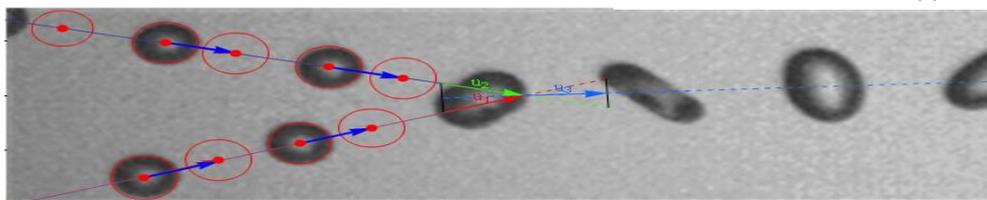


Abbildung 4: Ausgewertete Bilder der Hochgeschwindigkeitskamera; zeitlicher Versatz 165µs; leere Kreise: Tropfen des zweiten Bildes; gefüllte Kreise: Tropfen des ersten Bildes

Wie sich aus Abb. 3 und 4 erkennen lässt, kann mit dem neuen Kriterium ein kleiner räumlicher Abstand überbrückt werden. Jedoch funktioniert das nicht beliebig und die Verschiebung sollte nur maximal 75% des Durchmessers betragen. Die Methode hat außerdem den Vorteil, dass nun mehrere Tropfen, die sich weiter entfernt vom Kollisionspunkt befinden, trotzdem richtige Ergebnisse für den Kollisionspunkt liefern. Der Vergleich zwischen aufgezeichneter Tropfenkollision und dem Ergebnis der Tropfenverfolgung stimmt gut überein (Abbildung 5 und Abbildung 6). Das Stoffsystem Wasser wurde für die Validierung der Methode verwendet, weil hier genügend Messdaten und theoretische Vorhersagen für die Grenzkurven vorhanden sind.

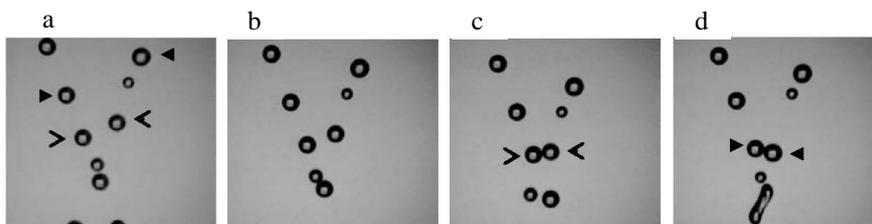


Abbildung 5: Fotografien von Tropfenkollisionen; Bilder a) und b) dienen der Bestimmung der Fluggeschwindigkeit und Richtung (Tropfen, die mit gleichen Pfeilen markiert sind, kollidieren später miteinander); Bilder c) und d) zeigen die Kollision der Tropfen von 5 a)

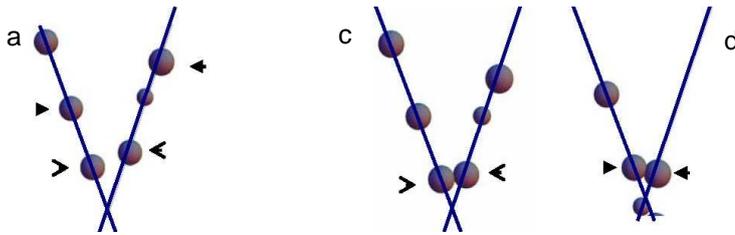
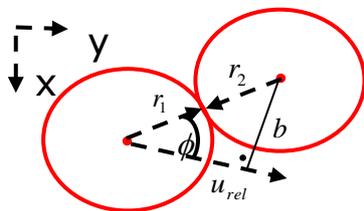


Abbildung 6: Berechnete Bewegung der Tropfen bis zum Kollisionspunkt

Der Auftreffwinkel in dieser Ebene (siehe Abb. 5) wurde kontinuierlich verändert, indem ein Frequenzversatz zwischen den Tropfengeneratoren angewendet wurde [9]. Damit konnte die Variation des Auftreffparameters (zwischen 0 und 1) in einem Experiment realisiert werden. Die Parameter für die Darstellung der Kollisionskarten sind zum einen, wie bereits genannt, der Auftreffparameter und zum anderen die Weberzahl. Beide sind in Gl. (1) bzw. Abb. 7 und Gl. (2) definiert.



$$B = \frac{b}{r_1 + r_2} = \sin \phi \quad (1)$$

$$We = \frac{\rho_l D_d \vec{U}_{rel}^2}{\sigma_l} \quad (2)$$

Abbildung 7: Definition des Auftreffparameters

## Ergebnisse

Die Experimente wurden wie oben beschrieben durchgeführt. Neben dem gelösten Polymer und der Suspension wurde zusätzlich noch deionisiertes Wasser untersucht, um die neue Methode anhand bereits aus der Literatur bekannter Ergebnisse zu validieren [1]. In allen Messungen werden die bekannten Kollisionsergebnisse beobachtet, nämlich Abprallen (Bouncing), Koaleszenz und Separation. Bei Wasser (Abb. 8) findet das Abprallen in der Regel nur bei größeren Auftreffparametern statt. Koaleszenz ist bei sehr kleinen Weberzahlen über den gesamten Bereich von B zu beobachten.

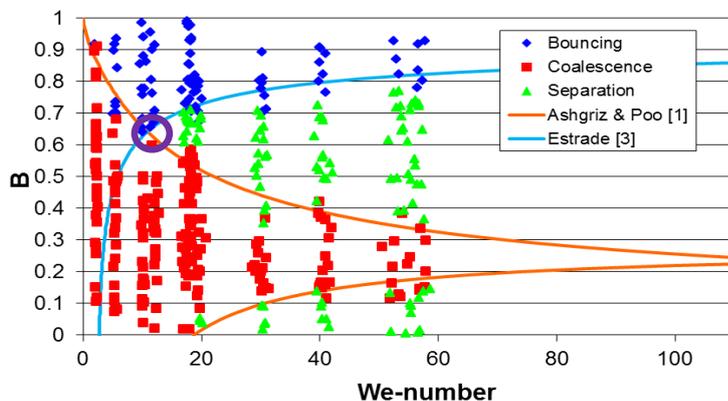


Abbildung 8: B-We-Diagramm für Wasser

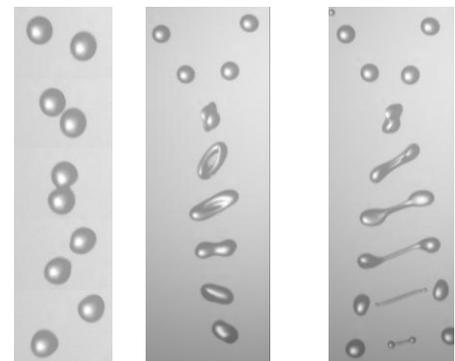


Abbildung 9: Wasser Bouncing, Koalesz., Separat.

Große B-Werte ergeben sich bei geringem Strahlwinkel, womit eine lange Kontaktzeit der Tropfen verbunden war und damit Koaleszenz sehr wahrscheinlich wird. Mit steigender Weberzahl nimmt dieser Bereich ab und es wird bei höherem B zunehmend dehndere Separation beobachtet. Die hier gefundenen Grenzen zwischen Koaleszenz und dehrender Separation bzw. Koaleszenz und reflexiver Separation stimmen mit denen von Ashgriz & Poo [1] gefundenen Verläufen gut überein. Selbiges ist auch für die Grenzlinie zwischen Bouncing und Separation von Estrade et al [3] erkennbar, obwohl diese Korrelation auf Messungen mit Ethanoltröpfchen basiert.

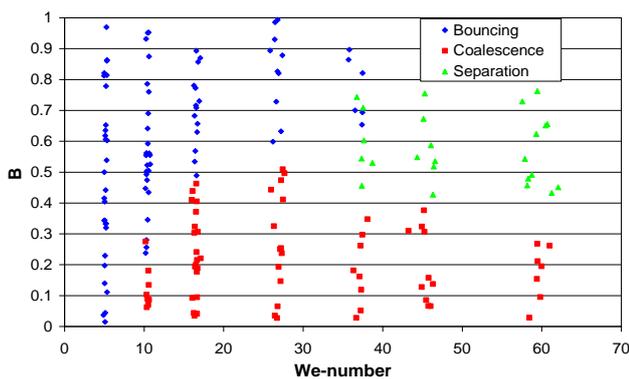


Abbildung 10: B-We-Diagramm für K30 - 15 Ma%

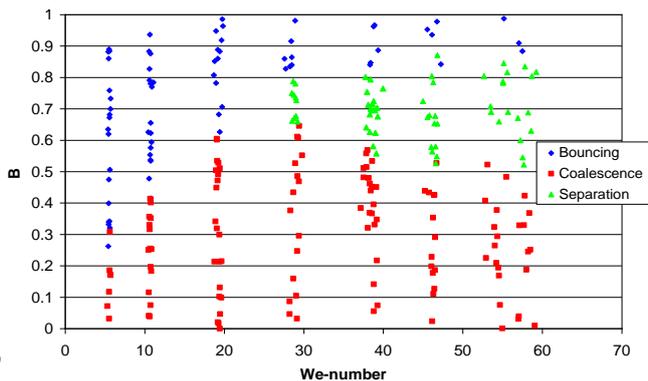


Abbildung 11: B-We-Diagramm für K30 - 25 Ma%

Die Kollision von PVP-Tropfen mit geringem Feststoffgehalt liefern ähnliche Kollisionsdiagramme und Bereichsgrenzen wie Wasser (nicht gezeigt z.B. K30 – 5 Ma.%). Bei höheren Feststoffgehalten verändert sich das Kollisionsdiagramm allerdings erheblich (Abb. 10 und 11). So verschwindet die reflexive Separation im untersuchten Bereich vollständig. Auch lässt sich ein deutlich verändertes Abprallen (Bouncing) erkennen. Zunächst steigt der Anteil des Bouncing mit steigendem Massenanteil bei niedrigen Weberzahlen an (bei 5 bis 15 Ma% sichtbar), aber ab 20 Ma.% verringert sich dieser Anteil wieder. Dies ist ein Hinweis darauf, dass es zu einem Wechsel des dominierenden Phänomens kommt. Es ist anzunehmen, dass der Umschlag von oberflächen- zu viskositätsdominierten Tropfenkollisionen hier einsetzt [8]. Die Abgrenzung dieser beiden Verhaltensweisen soll in der nächsten Projektphase betrachtet werden. Im Zusammenhang damit steht auch der immer größer werdende Anteil an Koaleszenz und die Verschiebung des Beginns der Separation mit steigendem Feststoffgehalt. Ein prinzipiell gleiches Verhalten lässt sich auch bei dem PVP - K17 feststellen.

Die Grenzkurven zwischen den Kollisionsregimen wurden über die Anpassung eines Polynoms 3. Grades an die Grenzwerte der Regime erhalten (Abb. 10 und 11). Für die Untergrenze des Bereichs Abprallen zeigt sich im Vergleich zu Wasser zunächst, dass der Anteil von Bouncing bei niedrigen Relativgeschwindigkeiten (kleine Weberzahlen) bis 15 Ma.% wächst und danach wieder abnimmt. Auffällig ist jedoch, dass bei größeren Relativgeschwindigkeiten, ein unterer Grenzwert von etwa  $B=0.75$  liegt. Im Kontrast hierzu

stehen die Begrenzungskurven für Koaleszenz und dehrender Separation (Grenzcurve zwischen Koaleszenz und reflexiver Separation für kleine B wurde herausgenommen, weil nicht für alle Systeme vorhanden). Während bei Wasser noch eine stetige Abnahme der Koaleszenz für höhere Weberzahlen zu erkennen ist, tritt bei allen feststoffhaltigen Lösungen eine Spitze in der Verteilung der Koaleszenz auf, die in Richtung höherer Weberzahlen wieder abnimmt. Für 5 Ma.% ist der Verlauf nicht ganz korrekt getroffen, weil auch für Relativgeschwindigkeiten  $>3$  m/s noch Koaleszenz existiert. Prinzipiell ähneln sich auch hier die Verläufe, sodass ebenfalls ein Grenzwert bei höheren Geschwindigkeiten existieren könnte. Ein weiterer wichtiger Ansatzpunkt für die Modellierung ist der Punkt, an dem sich die Grenzkurven Koaleszenz/dehnde Separation und Bouncing/dehnde Separation kreuzen (siehe violetter Kreis in Abbildung 8). Dieser Kreuzungspunkt (siehe Abb. 13) wird mit steigendem Massenanteil zunächst zu höheren Relativgeschwindigkeiten verschoben und fällt dann wiederum ab. Dieser Verlauf wurde für beide Lösungen gefunden (K17 und K30).

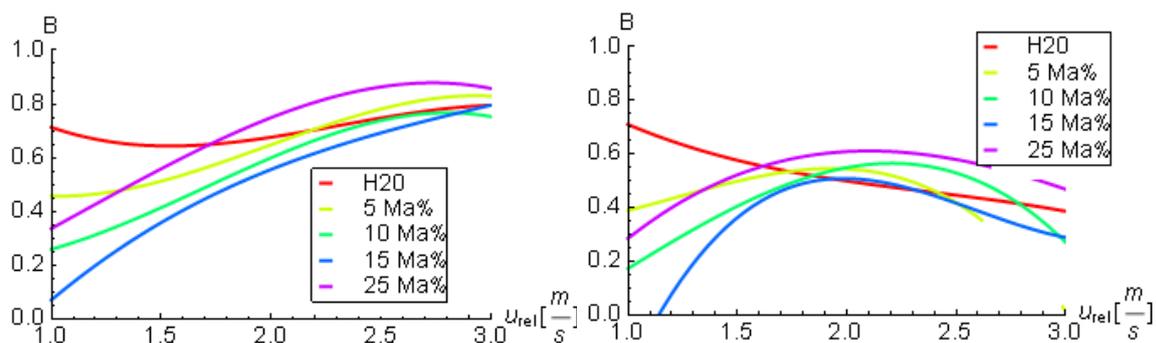


Abbildung 12: Grenzkurven für PVP - K30 mit verschied. Feststoffgehalt; links untere Grenze Bouncing; rechts obere Grenze Koaleszenz

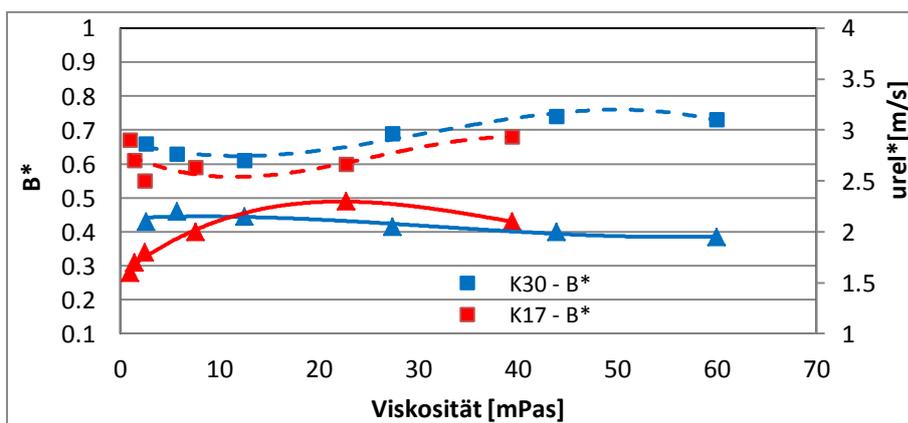


Abbildung 13: Verschiebung der Regimegrenze Bouncing-Koaleszenz-Separation für  $B^*$  (gestrichelte Linie) und  $u_{rel}^*$  (durchgezogene Linie)

Hieraus ist ersichtlich, dass ein ausgeprägtes Maximum (durchgezogene Linie) existiert, also eine kritische Geschwindigkeit, bei der Separation zum ersten Mal auftritt. Gleichzeitig

existiert ein klares Minimum (gestrichelte Linie) für den Auftreffwinkel  $\beta$ . Das Maximum bzw. Minimum könnten genutzt werden, um die Messdaten so zu normieren, dass sie sich für alle Feststoffanteile vereinigen, was ein großer Schritt für die Modellierung darstellen würde.

### Flachstrahlanlage

Zur Untersuchung von Koaleszenz und Agglomeration von Tropfen in zwei wechselwirkenden Sprühnebeln wurde eine Flachstrahlanlage aufgebaut und in Betrieb genommen. Die Montage der Peripherie gestaltete sich aufwendiger als erwartet, jedoch konnte die Anlage bis zum heutigen Tage in Betrieb genommen werden und erste Strömungsmessungen mit Tracerpartikeln durchgeführt werden.



Abbildung 14: Flachstrahlanlage, geplant und realisiert

Die Messstrecke hat eine Breite von 1,5 m und eine Höhe von 1 m. Sie wird von oben nach unten mit heißer Luft durchströmt (Temperaturbereich ca. 20 – 200°C). Unterhalb der Einströmung (konische Erweiterung mit Leitblechen) sitzen zwei Flachstrahldüsen, die horizontal gegeneinander verschoben werden können. Somit kann der Überlappungsbereich der beiden Sprühnebel gezielt in unterschiedlichen vertikalen Positionen (Entfernungen von der Düse) eingestellt werden. Damit wird es möglich sein, Tropfen mit unterschiedlichen Trocknungszuständen zur Kollision zu bringen. Im Nahbereich der Düsen werden oberflächenspannungsdominierte Tropfen vorliegen und im Fernbereich kommt es zu Kollisionen von hochviskosen Tropfen. Am Ende der Messstrecke werden Proben der Partikel entnommen und diese hinsichtlich Größe und Form analysiert. Nach abgeschlossener Modellentwicklung, dass aus den Messdaten der Tropfenanlage gewonnen wird, werden die Messungen aus der Flachstrahlanlage für die Validierung numerischer Berechnungen mit dem Euler/Lagrange Verfahren genutzt.

### Modellierung

Die Modellierung ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht tragfähig, weshalb nur die Grundzüge vorgestellt werden sollen. Als Ausgangspunkt der Berechnung steht eine Drehung des

Koordinatensystems, so dass das neue System die Verbindung der Tropfenmittelpunkte als x-Achse definiert. Aufgrund der Tatsache, dass nur integrale Größen, wie Impuls, Energie und tropfenspezifische Eigenschaften, wie Größe und Position bekannt sind, können nur Kraftwirkungen bzw. deren Änderungen bestimmt werden. Diese werden aus dem ursprünglichen System in das neue System über eine Richtungsmatrix (auch in 3 D bereits möglich) transformiert und bestimmt. Die jeweiligen Kraftanteile oder Spannungsanteile werden dann in einer Matrix zusammengefasst und in normalen und tangentialen Anteil unterschieden. Über Tensorzerlegungen (Gl. 3-5) wird nun versucht wesentliche Informationen aus den einzelnen Tensoranteilen (symmetrisch (4) und antisymmetrisch(5)) zu gewinnen. Somit kann für jede Kollision die Impuls- bzw. die Spannungsänderung, die auf eine normierte Fläche bezogen wird, bestimmt werden. Gleiches lässt sich aus der Energiebilanz erhalten (Gl. 6 und 7). Die Untersuchung der Zusammenhänge steht noch aus.

#### Impulswirkungen

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d & u & v \\ x & e & w \\ y & z & f \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\sigma_{sym} = \begin{pmatrix} d & \frac{1}{2}(u+x) & \frac{1}{2}(v+y) \\ \frac{1}{2}(u+x) & e & \frac{1}{2}(w+z) \\ \frac{1}{2}(v+y) & \frac{1}{2}(w+z) & f \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\sigma_{antisym} = \begin{pmatrix} d & -\frac{1}{2}(x-u) & -\frac{1}{2}(y-v) \\ \frac{1}{2}(x-u) & e & -\frac{1}{2}(z-w) \\ \frac{1}{2}(y-v) & \frac{1}{2}(z-w) & f \end{pmatrix} \quad (5)$$

#### Energiebilanz

$$E_{Kin,i} + E_{\sigma,i} = E_{rot,i} + E_{Kin,i} + E_{\sigma,i} + \Delta E_{diss} \quad (6)$$

$$E_{Kin,i} = \frac{1}{2} m_i u_i^2 \quad \text{kinetische Energie der Tropfen}$$

$$E_{rot,i} = \frac{1}{2} J_i \omega_i^2 \quad \text{Rotationsenergie}$$

$$E_{\sigma,i} = \sigma A_o \quad \text{Oberflächenenergie} \quad (7)$$

#### Literaturverzeichnis

- [1] Ashgriz, N.; Poo, J.Y.: "Coalescence and separation in binary collisions of liquid drops", *Journal of Fluid Mechanics* 221:183-204 (1990).
- [2] Brenn, G., Kolobaric, V. "Satellite droplet formation by unstable binary drop collisions", *Physics of Fluids*, 18, 087101-1 – 18 (2001).
- [3] Estrade, J.-P., Carentz, H., Lavergne, G., Biscos, Y. "Experimental investigation of dynamic binary collision of ethanol droplets - a model for droplet coalescence and bouncing", *International Journal of Heat and Fluid Flow* 20, 486-491 (1999).
- [4] Gotass, C., Havelka, P. Jakobson, H. A. and Svendsen H.F.: "Evaluation of the impact parameter in droplet droplet collision experiments by the aliasing method", *Physics of Fluids* 19:102105 (1-11) (2007)
- [5] Jiang, Y. J., Umemura, A. and Law, C.K.: "An experimental investigation on the collision behavior of hydrocarbon droplets", *Journal of Fluid Mechanics* 234:171-190 (1992).
- [6] Kurt, O., Fritsching, U. and Schulte, G.: "Binary Collisions of Droplets with Fluid and Suspension Particles", 21<sup>th</sup> ILASS 2007.
- [7] Qian, J. and Law, C.K.: "Regimes of coalescence and separation in droplet collision", *Journal of Fluid Mechanics* 331:59-80 (1997).

- [8] Blei, S. and Sommerfeld, M.: CFD in Drying Technology-Spray Drying Simulation. Modern Drying Technology: Volume 1 Computational Tools at Different Scales (Eds. E. Tsotsas and A. S. Majumdar), WILEY-VCH, Weinheim, pp. 155 - 208 (2007)
- [9] Havelka, P., Gotaas, C., Jakobsen H. A., Svendsen, H. F.: Droplet Formation and Interactions under Normal and High pressure, 5<sup>th</sup> ICMF 2004, Paper No. 123

## 2.2 Verzeichnis projektspezifischer Publikationen

### a) Begutachtete Publikationen:

Kröner, M., Sommerfeld, M.: Experimental investigation of droplet collision with higher viscosity, 23th European Conference on Liquid atomization and Spray Systems, Brno, Czech Republic, ISBN: 978-80-7399-997-1, Paper no. 102, (2010)

### b) Andere Veröffentlichungen:

Kröner, M., Sommerfeld, M.: Experimentelle Untersuchung von Tropfenkollisionen viskoser Stoffe, 9. Workshop über Sprays, Techniken der Fluidzerstäubung und Untersuchung von Sprühvorgängen, Heidelberg (2010)

### c) Patente: Entfällt

## 3 Ziele und Arbeitsprogramm

### 3.1 Ziele

Das Primärziel des Forschungsvorhabens liegt in der Modellbildung zur Abgrenzung der Kollisionsregime für oberflächenspannungsdominierte Lösungs- und Suspensionstropfen als auch der Modellierung der Agglomeration von viskositätsdominierten Tropfen. Diese Modelle werden in einen Euler/Lagrange Ansatz implementiert, um schließlich Sprühtrocknungsprozesse und die Eigenschaften der entstehenden Produkte vorherzusagen. Für oberflächenspannungsdominierte Tropfen besteht die Aufgabe darin, Impuls und Energie, sowie die bei einer Kollision wirkenden Kräfte so zu verknüpfen, dass ein allgemeingültiges Modell zur Abgrenzung der Regime entsteht. Weiterhin ist es notwendig, die experimentelle Datenbasis und die Experimentiertechnik für höhere Viskositäten zu erweitern, um schließlich zu viskositätsdominierten Tropfen zu gelangen. Darauf aufbauend lässt sich dann die Abgrenzung zwischen den beiden Tropfeneigenschaften quantifizieren.

Mit der bisherigen experimentellen Ausrüstung ist es nicht möglich den Viskositätsbereich auf über 80 mPas auszudehnen. Gerade der Bereich >100 mPas ist aber für Trocknungsprozesse relevant, da in diesem Bereich ( $Oh^2 > 1$ ) das Verhalten der Tropfen im Wesentlichen durch viskose Kräfte bestimmt wird. Bei Kollisionen zwischen derartigen Partikeln können diese teilweise ineinander eindringen und somit Agglomerate bilden. Für die Erzeugung von Tropfen höherer Viskosität wird ein Einzeltropfen-Düsensystem erforderlich, das monodisperse, hochviskose Tropfen liefert. Hierfür wurden bereits Tauglichkeitstests mit dem Hersteller Inducap durchgeführt und es stellte sich heraus, dass die geplante Anlage die geforderten Spezifikationen erfüllt. Der Kollisionsvorgang und die Penetration hochviskoser Lösungs- und Suspensionstropfen werden mit Hilfe von zwei Hochgeschwindigkeitskameras erfasst.

Ein weiteres wichtiges Ziel ist die experimentelle Untersuchung von Koaleszenz bzw. Agglomeration in der Flachstrahlanlage und der Vergleich mit den noch zu erstellenden Modellen bzw. den geplanten Euler/Lagrange Berechnungen. Der Überlappungsbereich der zwei Flachstrahl-Sprühnebel kann so eingestellt werden, dass oberflächenspannungsdominierte oder viskositätsdominierte Tropfen kollidieren. Die Kollisionen innerhalb des Sprühnebels und deren Ergebnisse werden wiederum mit Hochgeschwindigkeitskameras erfasst.

### **3.2 Arbeitsprogramm**

Während der ersten Förderperiode lag das Hauptziel in der Schaffung einer ausreichenden Datenbasis für die Kollision von Lösungstropfen, deren Viskositätsbereich  $<100$  mPas ist. Bis jetzt konnten bereits 12 Stoffsysteme mit unterschiedlichem Feststoffgehalt analysiert werden. Auf der Grundlage der in der ersten Förderperiode erhaltenen Datenbasis wird zunächst ein Modell zur Abgrenzung der Kollisionsregime (also den Grenzen zwischen Bouncing - Koaleszenz, Koaleszenz - Separation und Bouncing – Separation) entwickelt. Insbesondere müssen bei dem Modell die dissipierten Energieanteile berücksichtigt werden, um allgemeingültiger als bisherige Modelle [1,3,5,7] zu sein. Die Arbeitsgruppe um Prof. Bothe erarbeitet eine Methode um die einzelnen Energieanteile aus den DNS (direkte numerische Simulationen) von Tropfenkollisionen zu extrahieren, um die Modellentwicklung zu unterstützen. Besonders wichtig sind dabei die dissipierten und rotatorischen Energieanteile, da diese messtechnisch kaum erfassbar sind. Das Modell wird dann mit den experimentellen Daten der Tropfen- und Flachstrahlanlage verglichen.

Für die zweite Projektphase ist zunächst eine Erweiterung der Tropfenstrahlanlage auf einen Viskositätsbereich bis zu 1 Pas geplant. In diesem Bereich werden Experimente in Viskositätsintervallen von etwa 150 mPas durchgeführt, wodurch insgesamt weitere 5 bis 6 Feststoffgehalte hinzukommen. Somit werden im Rahmen des Forschungsprojekts 18 verschiedene Feststoffgehalte bei Polymerlösungen und mindestens weitere 3 für Suspensionen untersucht. Um diesen Bereich allerdings analysieren zu können, ist die Planung, Entwicklung und Konstruktion einer neuen Tropfenkollisionsanlage in Kooperation mit der Firma Inducap notwendig. Ursprünglich stammt das Verfahren der Firma aus der Mikroverkapselung, bei dem sehr enge Partikelgrößenverteilungen angestrebt werden. Hierfür werden hydraulische Impulse über einen Kolben an die Flüssigkeit übertragen, sodass der Flüssigkeitsstrahl diskret durch die Unterbrechung des Flüssigkeitsstroms zerfällt (siehe Abb. 15).

Bei diesem Verfahren ist zum einen die Anzahl der entstehenden Tropfen variabel und zum anderen können höhere Relativgeschwindigkeiten am Kollisionspunkt untersucht werden. Dies macht die Anlage auch für spätere Projekte interessant, bei denen das Splashing von Flüssigkeitstropfen untersucht werden könnte.

In Vorversuchen konnte bereits die Eignung des Verfahrens experimentell bestätigt werden. Dadurch ist es möglich, den Datenbereich weiter zu vergrößern und eine klare Abgrenzung des Übergangs von viskositäts- zu oberflächenspannungsdominierten Tropfen zu finden. Zwar sind bei den bisherigen Messungen bereits Ansätze zum Wechsel des dominierenden Tropfenverhaltens erkennbar, jedoch fehlen hierfür noch die Belege und vor allem eine Quantifizierung der Grenze. Anhand der zu findenden Grenze kann dann das aufgestellte Kriterium von Blei [8] überprüft und gegebenenfalls angepasst werden (siehe Tabelle 3.1). Zusätzlich sollte es die neue Anlage gestatten, die Suspension des Projektpartners Evonik, bzw. auch andere Suspensionen mit Feinstpartikeln, zu versprühen. Dies war mit den derzeit verwendeten Düsen bisher nicht möglich.



Abbildung 15: Anlage zur Herstellung von engverteilten Tropfen, ausgeführte Düsenköpfe (downscale)

Tabelle 3.1: Kriterien für Kollisionen von Suspensionstropfen von Blei [8]

Trocknungszustand	Charakteristik
Partikel dominiert durch Oberflächenspannungskräfte (std-particles)	$Oh^2 < 1$
Viskositätsdominierte Partikel (vd-particles)	$Oh^2 > 1$
Trockene Partikel (dry-particles)	Abgrenzung über den Feststoffgehalt des Tropfens

Bei der Kollision von hochviskosen Tropfen ist die Ausbildung von Agglomeraten ein besonderes Interesse. Dabei wird sowohl die Eindringtiefe der Primärpartikel ineinander als auch die Agglomeratstruktur untersucht und Einflussfaktoren der Prozessbedingungen auf die Eigenschaften der Agglomerate analysiert. Bei Kollisionen hochviskoser Tropfen oder unterschiedlich viskoser Tropfen werden sowohl eine zeitliche Auflösung des Vorgangs als auch die Bestimmung der Eindringtiefe angestrebt. Um dies zu ermöglichen, werden mit den beiden Düsen jeweils unterschiedlich viskose Tropfen durch verschiedene Feststoffgehalte erzeugt. Die oben beschriebene Anlage ermöglicht, durch die höhere Relativgeschwindigkeit der Tropfen, eine größere Penetrationstiefe von viskosen Tropfen. Mit Hilfe der zwei Hochgeschwindigkeitskameras kann diese Eindringtiefe in 2 Ebenen anhand der Abplattung oder der relativen Volumenzunahme des penetrierenden Tropfens während des Stoßprozesses abgeschätzt werden.

Die Flachstrahlanlage wurde wie bereits beschrieben, während der ersten Projektphase aufgebaut und steht nun für detaillierte Untersuchungen zur Verfügung. In der zweiten Phase sollen damit Kollisionen unter nahezu realen Trocknungsbedingungen durchgeführt werden. Die am Einlass zur Messkammer installierten Flachstrahldüsen (siehe Abb. 14) können so gegeneinander verschoben werden, dass die Wechselwirkung zwischen den Sprühstrahlen in unterschiedlichen Abständen vom Einlass erfolgt. Die eintretende Luft (mit ca. 0.5 - 3 m/s) kann auf unterschiedliche Temperaturen (bis zu ca. 200 °C) geheizt werden. Damit ist es möglich, Tropfen mit definierten Trocknungsgrad und somit verschiedener Viskosität zur Kollision zu bringen.

Liegt der Überlappungsbereich der Sprühnebel nahe der Düsen wird es hauptsächlich zur Kollision von oberflächenspannungsdominierten Tropfen kommen. Wenn der Überlappungsbereich weiter unterhalb der Düsen liegt dann haben die Tropfen genügend Zeit um teilweise zu trocknen und Kollisionen viskositätsdominierter Tropfen werden überwiegen. Es kommt also dann zur Entstehung von strukturierten Agglomeraten. Diese Agglomerate werden am Ende der Messstrecke durch Probenahme abgezogen und im Hinblick auf ihre Struktur analysiert. In Kooperation mit der Universität Bremen kann die Agglomeratstruktur aufgelöst werden und es ist möglich die Eindringtiefen zu bestimmen.

Damit der „Sprühtrockner“ später mit dem Euler/Lagrange Verfahren nachgerechnet werden kann, müssen alle Einlassbedingungen erfasst werden. Die Gasgeschwindigkeit wird für unterschiedliche Volumenströme und Temperaturen mit der Laser Doppler Anemometrie gemessen. Für die Messung der Tropfengrößenverteilungen direkt unterhalb der Düsen, also dort wo der Strahlerfall abgeschlossen ist, steht ein Zweikomponenten-Phasen Doppler-Anemometer zur Verfügung. Zur Untersuchung von Tropfenkollisionen im Überlappungsbereich der Sprühnebel wird wiederum ein bildgebendes Messverfahren (Schattenverfahren) und die PTV (Particle Tracking Velocimetry) wird zur Messung der Tropfengeschwindigkeit eingesetzt. Die Messung der Gasgeschwindigkeit innerhalb der Messstrecke soll mit der PIV (Particle Image Velocimetry) erfolgen. Mit Hilfe der vorhandenen Hochgeschwindigkeitskameras können die Kollisionseignisse zeitlich aufgelöst werden und die Resultate der Kollisionen erfasst werden. Dies gilt sowohl für oberflächen- als auch für viskositätsdominierte Tropfen.

Gegen Ende der zweiten Förderperiode soll mit den ersten Berechnungen auf Basis des Euler/Lagrange Verfahrens begonnen werden. Dies erfordert die Erweiterung der bisher implementierten Kollisions- und Agglomerationsmodelle (siehe Blei [8]) auf der Grundlage der durchgeführten Experimente.

In Tabelle 3.2 sind die Arbeitspakete und Kooperationen für die nächste Phase zusammengefasst. Dunkelgrau gekennzeichnet sind die einzelnen geplanten und ausgeführten Arbeitspakete und Kooperationen sind hellgrau hinterlegt.

Tabelle 3.2: geplante Arbeitspakete in der zweiten Projektphase

Arbeitsschritt	1. Jahr				2. Jahr				3. Jahr				4. Jahr			
	I	II	III	IV												
Schaffung der Datenbasis für das Modell	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Entwicklung der Bildverarbeitung mit erweiterten PTV Kriterium	■	■	■	■												
Ausbau und Inbetriebnahme der Flachstrahlanlage			■	■	■	■	■	■								
Hybrides Modell zur Abgrenzung der Kollisionsregime					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Vergleich bestehender Modelle mit Experimenten					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Strömungsmessung mit Tracerpartikeln bei Flachstrahlanlage					■	■	■	■								
Experimente zur Koaleszenz und Agglomeration mit Flachstrahlanlage									■	■	■	■	■	■	■	■
Hochgeschwindigkeitsaufnahmen in 2 Ebenen Tropfenanlage									■	■	■	■	■	■	■	■
Aufbau Hochviskos-Tropfenanlage									■	■	■	■				
Untersuchung hochviskoser Tropfenkollisionen und Erstellung von B-We-Diagrammen											■	■	■	■	■	■
Bestimmung der Eindringtiefe von hochviskosen Tropfen															■	■
Bestimmung der Struktur/ Morphologie von Agglomeraten															■	■
Kooperation mit Projekt A1 (Austausch Messdaten; Energieanteile)		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Kooperation mit Projekt A4(Vergleich Laboranlagen Levitator <->Tropfen)									■	■	■	■	■	■	■	■
Kooperation mit Projekt C3 (Stoffdaten, Sprühbildmessung)			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
Kooperation mit Projekt C5 (Struktur von Agglomeraten)																■

### 3.3 Untersuchungen am Menschen oder an vom Menschen entnommenem Material

- Entfällt –

### 3.4 Tierversuche

- Entfällt –

### 3.5 Gentechnologische Experimente

- Entfällt –

### 3.6 Forschungen, die unter das Übereinkommen über die biologische Vielfalt fallen

- Entfällt –

## 4 Beantragte Mittel

### 4.1 Personalbedarf

Das Projekt wird weiterhin von Dipl.-Ing. Matthias Kuschel (geb. Kröner) bearbeitet. Er hat sich hervorragend in die sehr komplexe Thematik eingearbeitet und die Ziele der ersten Projektphase fast vollständig verwirklicht. Er soll weiterhin mit einer vollen Stelle (BAT-O E13 TV-L) bezahlt werden.

Die nunmehr verstärkt anfallenden experimentellen Arbeiten sollen durch eine studentische Hilfskraft unterstützt werden. Der Arbeitsaufwand beträgt mindestens 60 Std./Monat.

Eine Aufstellung des Personalbedarfs ist im Folgenden gegeben:

1 wiss. Mitarbeiter nach BAT-O E13 TV-L (Dipl.-Ing. (Matthias Kuschel) für zwei Jahre

1 Stud. Hilfskraft (60 Std./Monat) für zwei Jahre

### 4.2 Wissenschaftliche Geräte

Anlage zur Erzeugung hochviskoser Einzeltropfen

€ 20.706.--

Mit den derzeitigen Düsen ist eine Steigerung des Viskositätsbereichs nicht mehr möglich, weshalb die Entwicklung eines neuen Düsensystems erforderlich ist. Die Firma Inducap ist

dazu in der Lage und erste Vorversuche haben gezeigt, dass die gewünschten hochviskosen Einzeltropfen erzeugt werden können. Deshalb ist diese Anlage für die weiteren Arbeiten unerlässlich. Es wurden bereits Investitionen in Höhe von 3500€ für das Downscaling der Standard-Düsenköpfe geleistet.

### 4.3 Verbrauchsmaterial

Verbrauchsmaterial für Rechentechnik (Speichermedien, Druckerpapier, Folien, Farbpatronen und Datenträger):	<u>€ 800.--</u>
Verbrauchsmaterial für Versuchsanlage (Profile, Befestigungsmaterial, Druckschläuche, Glasscheiben, Edelstahlplatten, Kleinmaterial)	<u>€ 2.500.--</u>
Verbrauchsmittel Messeinrichtungen (optische Kleinteile, Traversierungsteile etc.)	<u>€ 2.000.--</u>
Versuchssubstanzen (klassierte Partikel)	<u>€ 1.000.--</u>
Gesamtsumme Verbrauchsmaterial	<u>€ 6.300.--</u>

### 4.4 Reisen

Für die Realisierung dieses Forschungsvorhaben ist Erfahrungsaustausch sowie Zusammenarbeit mit den am Schwerpunktprogramm beteiligten Arbeitsgruppen erforderlich. Hierzu zählen insbesondere jene Forschungsgruppen, die sich mit der experimentellen und numerischen Analyse von Kollisions- und Agglomerationsprozessen befassen (siehe Abschnitt 5.2). Des Weiteren sind Besuche bei den Arbeitsgruppen von Prof. D. Bothe (Numerische Simulation der Kollision) und Prof. Peuker in Freiberg geplant.

Ferner ist die Teilnahme an den ProcessNet Jahrestagungen, den Sitzungen der ProcessNet-Fachausschüsse "CFD" und "Mehrphasenströmungen" sowie an zwei internationalen Konferenzen wie die „24<sup>th</sup> European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems“ (2011), „12<sup>th</sup> International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems“ (2012) und der „10<sup>th</sup> World Congress on Chemical Engineering“ (2013), ICMF (2013) oder vergleichbares vorgesehen.

Reisekosten (ca. 3.500.-- €/Jahr):	<u>€ 7.000.--</u>
------------------------------------	-------------------

### 4.5 Publikationskosten

Für farbige Publikationen in z.B. <i>Experiments of Fluids</i> etc.	<u>€ 1.500.--</u>
---	-------------------

### 4.6 Sonstige Kosten

- Entfällt -

## 5 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

### 5.1 Zusammensetzung der Arbeitsgruppe

Das beantragte Forschungsvorhaben wird in der Arbeitsgruppe „Mehrphasenströmungen“ am Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg unter der Leitung des Antragstellers durchgeführt.

Die Arbeitsgruppe „Mehrphasenströmungen“ setzt sich derzeit aus folgenden Mitarbeitern zusammen, die jeweils auf den angegebenen Themengebieten arbeiten:

Dipl.-Ing. M. Dietzel	Herstellen von funktionalen Feststoffpartikeln im Sprühverfahren
Dipl.-Ing. (FH) M. Ernst	Direkte numerische Simulation der Agglomerationsvorgänge nano-skalierte Partikel in turbulenten Strömungen
Dipl.-Ing. M. Kuschel	Experimentelle Untersuchung und Modellierung von binären Tropfenkollisionen höherer Viskosität
Dipl.-Ing. S. Stübing	Lagrangesche Modellierung der Agglomeratstruktur für Prozesse der Sprühtrocknung mit simultaner Agglomeration
M.Sc. Yan Cui	Die Bedeutung interpartikulärer Wechselwirkungen für die Anwendung von Pulvern zur Inhalation

## **5.2 Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern**

Im Rahmen des DFG-SPP 1423 besteht eine besonders enge Kooperation mit den folgenden Forschungseinrichtungen; bzw. wird eine Kooperation in der nächsten Projektphase aufgenommen:

### Prof. Bothe (TU Darmstadt, CSI), Projekt A1:

Die Arbeitsgruppe um Prof. Bothe kann durch die direkte numerische Lösung (FS3D) der Navier-Stokes-Gleichungen detaillierte Informationen über die Verteilung der Energieanteile bei Tropfenkollisionen bestimmen, die für die Erstellung unseres Modells von großem Interesse sind. Hinzu kommt, dass Untersuchungen für höhere Viskosität durchgeführt werden. Auch hier hat die Arbeitsgruppe die Möglichkeit die Kollision aufgelöst zu betrachten und sowohl Eindringtiefen als auch Agglomeratbildung (binäre) numerisch zu untersuchen. Des Weiteren können die simulierten Kollisionen mit realen Kollisionen verglichen werden. Ebenfalls können zusätzliche Experimente durchgeführt werden, um bestimmte Effekte zu untersuchen.

### Prof. Moritz (Universität Hamburg), Projekt A4:

Die Untersuchung des Trocknungsverhaltens an der Universität Hamburg liefert uns wertvolle Informationen für die eigenen Sprühturmexperimente und auch einen Vergleich zwischen dem Modelltrocknungssystem und einem realen System. Weiterhin ist es auch möglich, unseren Sprühturm so einzusetzen, dass dort monodisperse Tropfen getrocknet werden, womit ein Vergleich zwischen Levitator getrockneten Tropfen und Sprühturm getrockneten Tropfen angestellt werden kann. Das angestrebte Ziel ist es, die Ergebnisse der Laboranlagen miteinander zu verknüpfen und ineinander zu überführen, sodass man den größtmöglichen Nutzen aus den Einzelversuchen ziehen kann. Dadurch kann ein besserer Vergleich zwischen realen und idealen Testsystemen geschaffen werden und aufgestellte Trocknungsmodelle besser verstanden und überprüft werden.

Prof. Peuker (Bergakademie Freiberg), Projekt C3:

Eine sehr wichtige Kooperation besteht mit der Bergakademie aus Freiberg, indem sie mehrere Messverfahren hinsichtlich Reproduzierbarkeit und Verfügbarkeit der Stoffwerte überprüft haben. Sie stellt uns außerdem einen Großteil der benötigten Stoffdaten zur Verfügung. In Zukunft soll die Kooperation dahin gehend verstärkt werden, dass wir für die Bergakademie Sprühbildmessungen durchführen. Des Weiteren existiert auch eine Parallelität zwischen der Sprühpolymerisation, bei der der Feststoffanteil des PVP mit der Zeit ansteigt und einer Trocknung von niedrig viskosen Tropfen. Daraus ergeben sich interessante Aspekte hinsichtlich der Kollisionen zwischen Tropfen unterschiedlichen Polymergehalts.

Dr. Uhlenwinkel (Universität Bremen), Projekt C5:

In Zusammenarbeit mit dem Projekt C5 soll eine Methode zur Analyse von Agglomeratstrukturen entwickelt werden, wobei der Fokus auf der Anzahl und Größe der Primärpartikel im Agglomerat liegt. Dabei wird eine Lichtmikroskopie mit Bildanalyse (G3 Morphologie Malvern) genutzt. Weiterhin ist es von Interesse, die Kompaktheit der Agglomerate zu untersuchen, denn diese ist eine direkte Zielgröße der verwendeten Flachstrahlanlage. Wir werden unsere High-Speed-Kamera der Universität Bremen für Untersuchungen des Primärzerfalls an der Anlage PA1 zu Verfügung stellen.

Prof. Gutheil (Universität Heidelberg), Projekt B1:

In Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe um Prof. Gutheil wollen wir einen Datenaustausch anstreben, indem Breakup- und Koaleszenz-Modelle mit unseren Messdaten verglichen werden. Hierfür werden wir weitere Experimente durchführen, um unseren Projektpartner mit Messdaten zu versorgen.

### **5.3 Apparative Ausstattung**

Folgende Ausrüstung steht für die geplanten Arbeiten bereits zur Verfügung:

- Piezodüsensystem zur Erzeugung von monodispersen Tropfenstrahlen relativ niedrigviskoser Flüssigkeiten (bis 80 mPas)
- Gebläse verschiedener Art und Leistung
- Zahnradpumpe mit niedriger Dosiermenge bis 17 bar

Als Messsysteme sind verfügbar:

- 2 Hochgeschwindigkeitskameras der Fa. Photron zur Visualisierung des Stoßvorganges in 2 Ebenen
- 1 Hochgeschwindigkeitskamera mit einer Bildrate von maximal 636 fps bei einer maximalen Auflösung von 1280x1024
- verschiedene Arten von Objektiven,
- LDA, PDA Systeme für Strömungs- bzw. und Größenmessungen

- verschiedene Beleuchtungsquellen (kontinuierliche Helium-Neon Laser, Nd-YAG-Doppelpulslaser, steuerbares Nano-Twin-Flash Gerät, Dioden-Felder verschiedener Bauarten, verschiedene Stroboskope), kontinuierliche und pulsare LED-Arrays,
- Erweitertes Auswertungsprogramm zur Bildanalyse via PTV und PIV
- Für die Durchführung der numerischen Berechnungen stehen am Lehrstuhl sechs sehr leistungsfähige Mehrkern-PCs zur Verfügung. Weiterhin kann am Rechenzentrum der Universität Halle-Wittenberg ein Parallelrechner kostenfrei genutzt werden.

#### **5.4 Laufende Mittel für Sachausgaben**

Für die Verwaltung des Vorhabens sowie das Schreiben von Berichten, etc. stehen Personal und Mittel des Institutes zur Verfügung. Diese Nebenkosten werden für ein derartiges Projekt derzeit auf etwa 3.000,-€/ Jahr geschätzt.

#### **5.5 Interessenkonflikte bei wirtschaftlichen Aktivitäten**

Keine

#### **5.6 Sonstige Voraussetzungen**

Keine

#### **6.0 Erklärungen**

##### **6.1 Antrag an anderer Stelle**

Ein Antrag auf Finanzierung dieses Vorhabens wurde bei keiner anderen Stelle eingereicht. Wenn wir einen solchen Antrag stellen, werden wir die Deutsche Forschungsgemeinschaft unverzüglich benachrichtigen.

##### **6.2 Regeln guter wissenschaftlicher Praxis**

Wir verpflichten uns, mit der Einreichung des Antrags auf Bewilligung einer Sachbeihilfe bei der DFG die Regeln guter wissenschaftlicher Praxis einzuhalten.

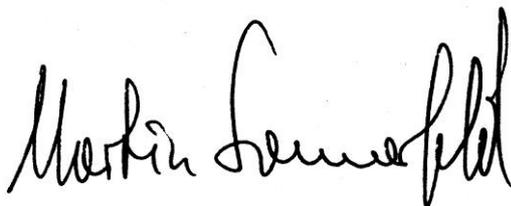
##### **6.3 Publikations- und Literaturverzeichnis**

Wir haben bei der Antragstellung die Regelungen zu den Publikationsverzeichnissen (Leitfaden I.8.) und zum Literaturverzeichnis (Leitfaden II.2.) beachtet.

##### **6.4 Sonstiges**

Entfällt

#### **7 Unterschrift**



Prof. Dr.-Ing. M. Sommerfeld Lehrstuhl Mechanische Verfahrenstechnik Zentrum für Ingenieurwissenschaften Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
--

#### **8 Verzeichnis der Anlagen**

**Anlage 1:** Angebot Firma Inducap

**Anlage 2:** Akademischer Werdegang Prof. Dr.-Ing. M. Sommerfeld