

## **Abschlussbericht an die Max-Buchner-Forschungstiftung**

Antragsteller: Prof. Dr.-Ing. Matthias Kraume  
Forschungsgebiet: Experimentelle und numerische Untersuchungen zum transienten Dispergieren in gerührten Flüssig/flüssig-Systemen  
Thema: Analyse von koaleszenzbestimmenden Stoff- und Prozessparametern auf das zeitliche Verhalten von Tropfengrößenverteilungen in gerührten Systemen (Kennziffer 2932)

### **Abstract**

Im Bereich der Mischvorgänge stellt das Dispergieren von Flüssig/flüssig-Systemen eine wesentliche Aufgabe dar. Speziell für Regelaufgaben ist nicht nur die Kenntnis der sich einstellenden stationären Tropfengrößenverteilung von Bedeutung, sondern es muss auch die zeitliche Entwicklung der Tropfengröße berücksichtigt werden. Darauf hat, neben Einflussgrößen, wie Geometrie-, Stoff- und Prozessparametern, auch das Koaleszenzverhalten der Systeme Einfluss. Um den Einfluss von koaleszenzbestimmenden Parametern zuverlässig quantifizieren zu können, muss zusätzlich der Tropfenbruch in Dispersionen verstanden werden.

Globales Ziel des Projektes ist es, eine Grundlage zur zuverlässigen Modellierung von transienten Tropfengrößenverteilungen mit Hilfe von Populationsbilanzen zu schaffen. Dazu müssen die koaleszenzbestimmenden Größen des Systems berücksichtigt werden, zusätzlich muss aber auch die Beschreibung des Tropfenzerfalls verbessert werden.

### **1. Einleitung**

Das Dispergieren von Flüssig/flüssig-Systemen in turbulenter Strömung ist Bestandteil zahlreicher Verfahren der chemischen, pharmazeutischen und lebensmitteltechnischen Industrie. Die gegenläufigen Phänomene des Tropfenbruchs und der Tropfenkoaleszenz beeinflussen dabei die sich einstellende Tropfengrößenverteilung (TGV) der dispersen in der kontinuierlichen Phase. Diese bestimmt direkt die sowohl für Wärme- und Stoffübergangsprozesse als auch für chemische Reaktionen zur Verfügung stehende Phasengrenzfläche. Eine Vorhersage von TGV ist zwar auf Grund der industriellen Relevanz wünschenswert, aber immer noch nicht uneingeschränkt möglich.

Prinzipiell kann die Vorhersage bzw. Modellierung von TGV mit halbempirischen Korrelationen, welche auf die Pionierarbeiten von Hinze (1955) und Kolmogorov (1958) zurückzuführen sind, oder durch sog. Populationsbilanzen (PBE) erfolgen (siehe z.B.

Hulburt und Katz 1964, Ramkrishna und Mahoney 2002). Dabei müssen sowohl physikalische Stoffparameter (Viskosität, Dichte, Grenzflächenspannung zwischen beiden Phasen) als auch Geometrie- und Betriebsparameter für eine zuverlässige Modellierung berücksichtigt werden. Um die Rolle der Koaleszenzeigenschaften, welche maßgeblich das transiente Verhalten der Verteilungen mitbestimmen, quantifizieren zu können, ist eine exakte und zuverlässige Beschreibung des Tropfenbruchs in den Modellen unabdingbar.

Es ist bekannt, dass sich die Dauer bis ein stationärer Endwert erreicht wird, wobei die eingangs genannten gegensätzlichen Phänomene im Gleichgewicht stehen, mit steigendem pH-Wert zunimmt. Zusätzlich wird eine Abnahme des stationären Endwertes beobachtet (Gäbler et al. 2006, Kraume et al. 2004), was durch Koaleszenzhemmung begründet wird. Eine Beschreibung der Koaleszenzhemmung bei steigendem pH-Wert mit Hilfe der PBE ist prinzipiell möglich (Maaß et al. 2007a). Das bisher einzige in der Literatur verfügbare Modell von Tobin und Ramkrishna (1999), das elektrostatische Effekte berücksichtigt, liefert jedoch hier keine brauchbaren Ergebnisse. Durch Schüttelversuche kann die Abhängigkeit der Koaleszenzhemmung von der Salzkonzentration gezeigt werden (Kraume et al. 2004, Pfennig und Schwerin 1998). Dabei nimmt die Absetzzeit, also die Zeit nach der sich ein dispergiertes System wieder in zwei getrennte Phasen getrennt hat, mit Erhöhung der Salzkonzentration tendenziell ab (Kraume et al. 2004).

Obwohl der Tropfenbruch schon in einer Vielzahl an Arbeiten untersucht wurde und daraus resultierend viele unterschiedliche Modelle zur Beschreibung des Bruchs innerhalb von PBE zur Verfügung stehen (siehe z.B. Lasheras et al. 2002, Liao und Lucas 2010), gibt es noch kein allgemeingültiges Modell zur Beschreibung des Vorgangs. Der Tropfenbruch kann im Rührbehälter z.B. durch Einsatz von sehr kleinen Dispersphasenanteilen (Hinze 1955) bis hin zur Untersuchung von einzelnen Tropfen erfolgen. Für die Beschreibung des Tropfenbruchs wurde bereits eine Vielzahl an Einzeltropfenuntersuchungen am Zerfallskanal durchgeführt (z.B. Maaß et al. 2007b, 2009, 2011a). Aus den Ergebnissen konnte ein neues Modell für die Bruchzeit innerhalb der PBE abgeleitet werden (Maaß und Kraume 2011). Simulationen von TGV mit diesem Modell zeigten, insbesondere bei Variation des Stoffsystems, bessere Übereinstimmungen mit experimentellen Daten, als wenn Literaturmodelle verwendet werden (Maaß et al. 2011b).

## 2. Experimentelle und numerische Untersuchungen

Im Rahmen des Projekts wurden umfangreiche experimentelle und numerische Untersuchungen durchgeführt. Es wurden Tropfengrößenverteilungen in gerührten Systemen bestimmt und der Einzeltropfenzerfall wurde systematisch in turbulenter Strömung analysiert. Daneben wurden Schüttelversuche durchgeführt, um die Koaleszenzeigenschaften des Systems mit geringem Aufwand bestimmen zu können und mit den Ergebnissen aus dem Rührbehälter zu verknüpfen. Die physikalischen Stoffgrößen (Grenzflächenspannung, Dichte, Viskosität) wurden mit gängigen Messtechniken erfasst.

Die experimentell bestimmten Zusammenhänge wurden mathematisch in Form von Modellen zur Beschreibung von TGV mit Hilfe von Populationsbilanzen beschrieben. Um diese zu validieren, wurden zusätzlich Tropfengrößenverteilungen simuliert.

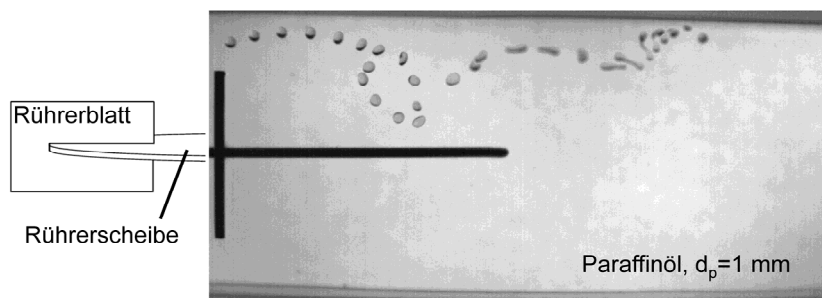
### *Experimentelle Untersuchungen im Rührbehälter*

Die experimentellen Untersuchungen von TGV wurden in einem vollständig bewehrten Laborrührreaktor (DN 150 mit Klöpperboden,  $h/D=1$ ) durchgeführt. Als Rührorgan wurde ein 6-Blatt-Scheibenrührer ( $d/D=0,2-0,5$ ) eingesetzt. Zur Erfassung der Tropfengrößenverteilungen wurde die Endoskopmesstechnik (Ritter und Kraume 2002, Maaß et al. 2010a) eingesetzt. Diese erlaubt die in-situ Bestimmung von transienten Tropfengrößenverteilung bei Dispersphasenanteilen von bis zu 50%. Die Auswertung der Bilder erfolgte in Abhängigkeit von der optischen Qualität automatisch (Maaß et al. 2010b) oder manuell. Hierzu wurden mindestens 250 Tropfen markiert, um eine Tropfengrößenverteilung berechnen zu können. Transiente Tropfengrößenverteilungen wurden unter Variation verschiedener Einflussgrößen (Geometrieparameter, Stoffsystem, Dispersphasenanteil, Energieeintrag) bestimmt.

### *Untersuchungen des Einzeltropfenzerfalls*

Der Tropfenbruch wurde unter Ausschluss von Koaleszenzvorgängen in turbulenter Strömung Zerfallskanal analysiert. Dabei ist in einem quadratischen Kanal der Ausschnitt eines 6-Blatt-Scheibenrührers montiert, um die Strömungsverhältnisse in einem Rührbehälter nachzustellen. Der Bruch einzelner Tropfen wird mittels Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen (siehe Abbildung 1). Um statistisch signifikante Ergebnisse zu erzielen, wurden in Abhängigkeit der Bruchwahrscheinlichkeit zwischen 1000 und 3500 Sequenzen aufgenommen. Die Auswertung der Bilddaten erfolgte automatisch durch eine auf MATLAB<sup>®</sup> basierte selbst mit- bzw. weiterentwickelte Auswertungsroutine. Damit wurden für die Beschreibung des

Bruchvorgangs relevante Größen, wie die Bruchwahrscheinlichkeit, die Bruchzeit und die Anzahl bzw. Größe der entstandenen Tochtertröpfchen, bestimmt. Weiterhin wurden die dem Bruch vorausgehenden Schwingungen und Deformationen erfasst. Es wurde eine Vielzahl an Stoffsystemen (Paraffinöle, Silikonöle, Lösungsmittel unterschiedlicher Viskositäten mit und ohne Zusatz von Tensiden) analysiert. Zusätzlich wurden unterschiedliche Tropfendurchmesser (0,35 - 3,0 mm) sowie unterschiedliche Relativgeschwindigkeiten zwischen Tropfen und Blatt berücksichtigt.



**Abbildung 1: Tropfenbruch im turbulenten Nachlauf eines einzelnen Rührerblattes.**

### *Schüttelversuche*

Zur Bestimmung des Koaleszenzverhaltens einzelner Stoffsysteme wurden Schüttelversuche durchgeführt und eine charakteristische Absetzzeit bestimmt. Hier stand bisher vor allem die Entwicklung einer bildbasierten Auswertungsroutine zur objektiven Bestimmung dieser Absetzzeit im Vordergrund. Weiterhin wurden standardisierte Versuchsbedingungen (konstante Schütteldauer, -intensität und Beleuchtung) erarbeitet um reproduzierbare Ergebnisse erzielen zu können.

Der Absetzvorgang wurde dazu mittels Webcam aufgezeichnet. Bei der auf Image Pro<sup>®</sup> basierten Auswertungsroutine wird nach einer Graustufenwandlung und Bildkorrektur ein Bereich in der kontinuierlichen wässrigen Phase analysiert. Wird hier ein bestimmter Anteil der anfangs vorliegenden Graustufen nach dem Schüttelvorgang wieder erreicht, wird der Koaleszenzvorgang als abgeschlossen betrachtet.

### *Simulationen von TGV*

Als Löser für die PBE und zur Bestimmung der optimierten numerischen Parameter wird die kommerzielle Software PARSIVAL<sup>®</sup> (Wulkow et al. 2001) verwendet. Die simulierten Energiedissipationsraten  $\varepsilon = 0,133, 0,345, 0,712 \text{ m}^2/\text{s}^2$  entsprechen dabei den in den Experimenten von Gäbler et al. (2006) verwendeten Drehfrequenzen ( $n = 400, 550, 700 \text{ min}^{-1}$ ). Bezüglich der numerischen Parameter der Koaleszenzmo-

delle wurden zunächst die ‚hydrodynamischen‘ Parameter des Modells von Coulaloglou und Tavlarides (1977) an die experimentellen Daten bei pH 7 und einer Drehfrequenz von  $n = 550 \text{ min}^{-1}$  angepasst. Anschließend wurde der ‚elektrostatische‘ Parameter des neu entwickelten Modells an die experimentellen Daten bei pH 13 und  $n = 550 \text{ min}^{-1}$  gefittet. Mit diesem Parametersatz wurden anschließend sämtliche Simulationen durchgeführt.

### 3. Experimentelle und numerische Ergebnisse

#### *Experimentelle und numerische Untersuchungen von TGV im Rührbehälter*

Es wurde ein Modellansatz entwickelt, welcher die sich ändernde Tropfenladung, die z.B. aus der Änderung des pH-Wertes resultiert, berücksichtigt. Wie bereits beschrieben, wird hierdurch maßgeblich das transiente Verhalten der TGVs beeinflusst. Es konnte gezeigt werden, dass eine Beschreibung der Koaleszenzhemmung bei steigendem pH-Wert durch eine Erweiterung existierender Modelle der PBE mit der DLVO-Theorie möglich ist. Dazu wurde das Modell von Coulaloglou und Tavlarides (1977) als Basis gewählt und darin die Koaleszenzwahrscheinlichkeit  $\lambda$  mit dem Ausdruck

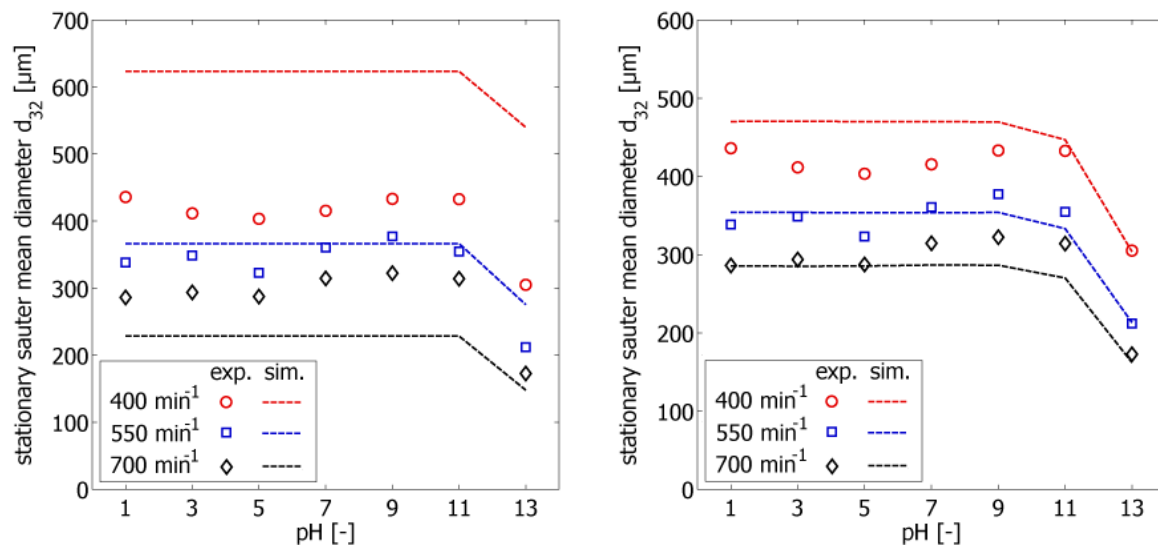
$$\lambda_{\text{EFM}}(V_p, V'_p) = \exp\left(-c_{3,c} \frac{F_{\text{elec}}}{F_{\text{vdW}}}\right) \quad (1)$$

erweitert, sodass der Einfluss der elektrostatischen Repulsion im Verhältnis zur Trägheitskraft, die die in Kontakt stehenden Tropfen zusammendrückt, berücksichtigt wird:

$$\lambda_{\text{total}}(V_p, V'_p) = \lambda_{\text{C\&T}}(V_p, V'_p) \cdot \lambda_{\text{EFM}}(V_p, V'_p) \quad (2)$$

Die elektrostatische Kraft wird dabei nach dem Modell der elektrostatischen Doppelschicht von Derjaguin et al. (1987) beschrieben. Die dazu benötigte Information zum Oberflächenpotenzial der Tropfen wird durch eine Adsorptionsisotherme der Anionen  $\text{Cl}^-$  und  $\text{OH}^-$  beschrieben, welche an systematische Zetapotenzialmessungen angepasst wurde (Kamp et al. 2012b). Mithilfe dieses Modells können die experimentellen Ergebnisse von Gäbler et al. (2006) bei einer konstanten Ionenstärke von 0,1 mol/L qualitativ gut beschrieben werden, was mit verfügbaren Modellen aus der Literatur nicht möglich ist. Wie in Abbildung 2 dargestellt, wird die signifikante Verkleinerung des Sauterdurchmessers, hervorgerufen durch eine Koaleszenzhemmung bei einem pH-Wert größer 11, mit diesem Modell abgebildet, während das einzig in der Literatur verfügbare Modell zur Beschreibung von elektrostatischen Effekten von Tobin und

Ramkrishna (1999) hier keine brauchbaren Ergebnisse liefert (Kamp et al. 2011, Kamp et al. 2012a).



**Abbildung 2: Stationärer Sauterdurchmesser bei Variation des pH-Wertes simuliert mit dem Koaleszenzmodell von Tobin und Ramkrishna (1999) (links) und dem neu entwickelten Modell (Kamp et al. 2012a) (rechts) im Vergleich zu den experimentellen Ergebnissen im Rührkessel (Gäbler 2006).**

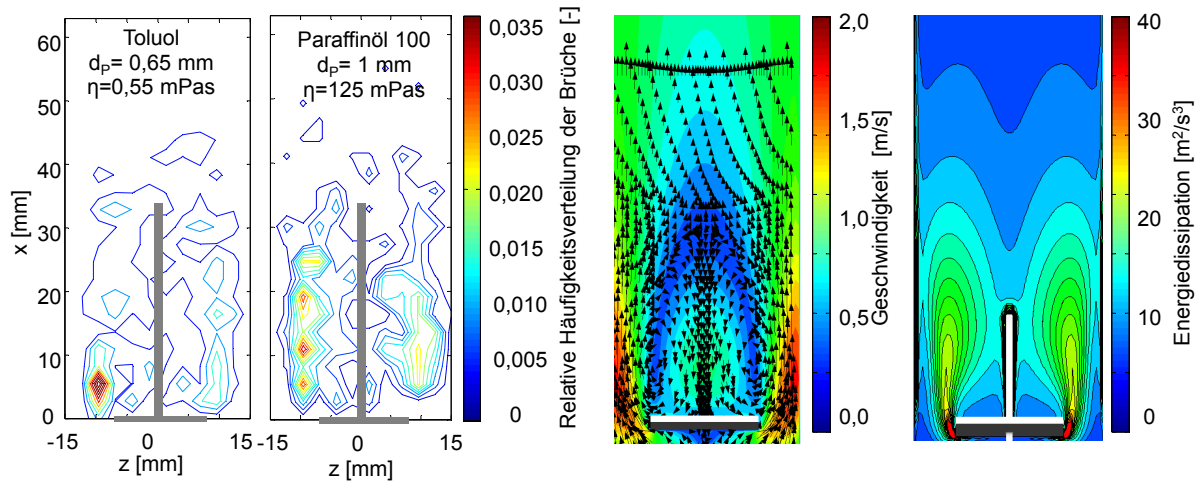
### Experimentelle Untersuchungen des Einzeltropfenzerfalls

Um ein tiefes physikalisches Verständnis für den Vorgang des Tropfenbruchs zu erlangen, wurde dieser systematisch im Rahmen der Einzeltropfenexperimente im Zerfallskanal untersucht. Der Einfluss unterschiedlicher Parameter (Tropfendurchmesser, Stoffsystem, Geometrieparameter, Energieeintrag) auf die Tropfendeformation (Nachtigall et al. 2012a) und den Tropfenbruch (Hermann et al. 2010b/c, 2011b, Nachtigall et al. 2012b, Nachtigall und Kraume 2013) wurde quantifiziert. Für eine physikalisch fundierte Beschreibung der Bruchzeit, wurde die Auswertungsroutine erweitert und die Bruchzeit als Zeit zwischen beginnender Tropfendeformation und Tropfenbruch definiert (Nachtigall et al. 2012a/b).

### Modellierung des Tropfenbruchs

Durch Vergleich der experimentell bestimmten Bruchorte im Zerfallskanal mit den durch numerisch Strömungssimulation bestimmten Strömungsgrößen der kontinuierlichen Phase konnte gezeigt werden, dass in Abhängigkeit des Stoffsystems und der Tropfengröße unterschiedliche Mechanismen, die letztlich den Bruch verursachen, vorliegen (Hermann et al. 2011c, Nachtigall et al. 2012c). Für niedrigviskose, kleine Tropfen ( $d_p < 1 \text{ mm}$ ) treten die meisten Brüche direkt nach dem Rührerblatt im Bereich der größeren Energiedissipation auf, mit zunehmendem Abstand vom Blatt nimmt die Anzahl der Brüche ab. Die turbulenten Schwankungen sind hauptsächlich für den

Bruch verantwortlich. Bei höherviskosen Tropfen dagegen, treten die Brüche vermehrt weiter hinter dem Blatt, im Bereich des Makrowirbels im Nachlauf auf. Die hier vorliegenden Gradienten der mittleren Geschwindigkeiten beeinflussen den Tropfenbruch (siehe Abbildung 3).



**Abbildung 3: Experimentell bestimmte Bruchort (links) im Vergleich zu den numerischen Strömungsgrößen (rechts).**

Lediglich die Initiierung des Tropfenbruchs, also der Beginn der Tropfendeformation liegt für diese Stoffsysteme im Bereich direkt nach dem Rührerblatt, wo die größte Energiedissipation vorliegt. Weiterhin müssen für eine zuverlässige Modellierung von höherviskosen Systemen Tropfenschwingungen und -verformungen berücksichtigt werden, die beim Durchlaufen des turbulenten Strömungsfeldes auftreten (Nachtigall et al. 2012a/b), bevor die Deformation, aus der dann letztlich die Zerteilung resultiert, beginnt.

Die Tropfenzerfallsereignisse wurden zusätzlich mit Hilfe der Ohnesorge- ( $Oh = \eta_d / (\rho_d d_p \gamma)^{1/2}$ ) und der Weberzahl ( $We = \tau d_p / \gamma$ ), welche in den Pionierarbeiten von Hinze (1955) und Kolmogorov (1958) zur Beschreibung des Tropfenbruchs herangezogen wurden, beschrieben. Diese Analyse erlaubte die Bestimmung von Einflussgrößen, welche für eine exakte Beschreibung des Tropfenbruchs berücksichtigt werden müssen. So zeigt zum Beispiel Abbildung 4, dass die Viskosität der Tropfenphase nur dann berücksichtigt werden muss, wenn sie im Verhältnis zur Grenzflächenspannung einen bestimmten Wert übersteigt. Für sehr kleine Ohnesorgezahlen liegt für die Korrelation zwischen Bruchwahrscheinlichkeit und Weberzahl ein sehr gutes Bestimmtheitsmaß vor (Nachtigall und Kraume 2013).

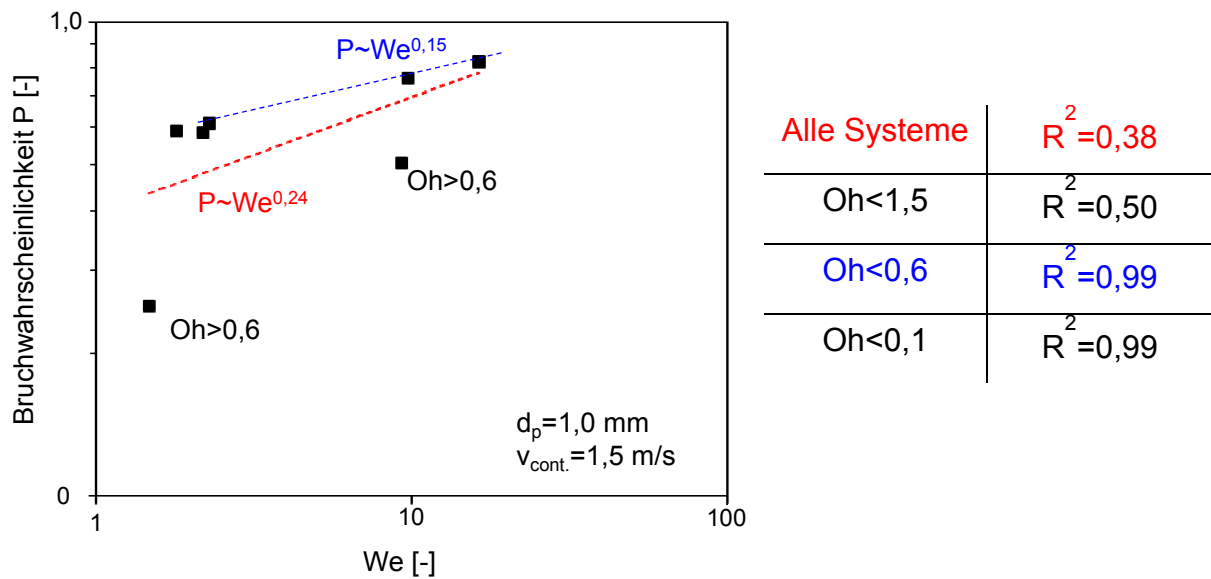


Abbildung 4: Bruchwahrscheinlichkeit über der Weberzahl für alle untersuchten Stoffsysteme ( $d_p=1,0 \text{ mm}$ ).

#### 4. Ausblick

In diesem Projekt konnten bislang grundlegende Einflüsse auf die Phänomene des Tropfenbruchs und der Koaleszenz experimentell gewonnen und erfolgreich in beschreibende Modelle implementiert werden. Die bisher erlangten Erkenntnisse aus den Einzeltropfenexperimenten sollen genutzt werden, um weitere physikalisch fundierte Submodelle (Bruchwahrscheinlichkeit, Anzahl/Größenverteilung der Tochtertropfen) innerhalb der PBE abzuleiten. Weiterhin sollen die Ergebnisse aus den standardisierten, objektiv ausgewerteten Schüttelversuchen für die zuverlässige Beschreibung der TGV mit einbezogen werden.



## Literaturverzeichnis

- Coulaloglou, C.A., Tavlarides, L.L., (1977): Description of Interaction Processes in Agitated Liquid-Liquid Dispersions, Chem. Eng. Sci 32 (11) 1289-1297.
- Derjaguin, B.; Churaev, N. & Muller, V. (1987): Surface forces, Consultants Bureau, Kitchener, J. (Ed.).
- Gäbler, A., Wegener, M., Paschedag, A.R., Kraume, M. (2006): The effect of pH on experimental and simulation results of transient drop size distributions in stirred liquid-liquid dispersions, Chem. Eng. Sci. 61 (9) 3018-3024.
- Gäbler, A. (2007): Experimentelle Untersuchungen, Modellierung und Simulation gerührter Flüssig-flüssig-Systeme mit veränderlichen Stoff- und Betriebsparametern, Dissertation Technische Universität Berlin.
- Hermann, S., Vazquez, S., Maaß S., Kraume, M. (2010a): Transientes Verhalten von Tropfengrößenverteilungen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Rührerdrehfrequenzfunktionen, ProcessNet Jahrestreffen des Fachausschusses Extraktion, 18.-19.3.2010, Kaiserslautern.
- Hermann, S., Zillmer, M., Maaß, S., Kraume, M. (2010b): Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss des pH-Wertes auf den Tropfenbruch in Flüssig/flüssig-Systemen, ProcessNet Jahrestreffen der Fachausschüsse Agglomeration, Zerkleinern/Klassieren und Mischvorgänge, Fulda.
- Hermann, S., Maaß, S., Walle, A., Schäfer, M., Kraume, M. (2010c): Experimental and numerical investigations of drop size distributions in stirred liquid/liquid systems, Mixing XXII, NAMF, Victoria BC, Canada.
- Hermann, S., Erdt, R., Maaß, S., Kraume, M. (2011a): Untersuchungen zur Steuerung von Tropfengrößenverteilungen, Vortragssammelband zum 13. Köthener Rührerkolloquium, Köthen. 2010.
- Hermann, S., Maaß, S., Walle, A., Schäfer, M., Kraume, M. (2011b): Einfluss des Stoffsystems und der Tropfengröße auf den Tropfenbruch, ProcessNet Jahrestreffen der Fachausschüsse Mischvorgänge und CFD, Dortmund.
- Hermann, S., Maaß, S., Zedel, D., Walle, A., Schäfer, M., Kraume, M. (2011c): Experimental and numerical investigations of drop breakage mechanism, Proceedings 1st International Symposium on Multiscale Multiphase Process Engineering, Kanazawa, Japan.
- Hinze, J.O. (1955): Fundamentals of the Hydrodynamic Mechanism of Splitting in Dispersion Processes, AIChE J. 1 (3) 289-295.
- Hulburt, H. M., Katz, S. (1964): Some Problems in Particle Technology - a Statistical Mechanical Formulation, Chem. Eng. Sci. 19 (8) 519-590.
- Kamp, J., Hermann, S., Maaß, S., Kraume, M. (2011): Modelling of coalescence in turbulent liquid/liquid dispersions considering droplet charge, 8th European Congress of Chemical Engineering, Berlin.
- Kamp, J., Nachtigall, S., Maaß, S., Kraume, M. (2012a): Modelling of coalescence in turbulent liquid/liquid dispersions considering droplet charge, Czasopismo Techniczne Mechanika 109(5), Politechnika Krakowska, 113-124, ISSN 1897-6328.
- Kamp, J., Nachtigall, S., Maaß, S., Kraume, M. (2012b): Modelling of coalescence in turbulent liquid/liquid dispersions considering droplet charge, Deutsch-Polnisches Symposium, 25.-27.9.2012, Krakau, Polen.
- Kolmogorov, A. N. (1958): Über die Zerstäubung von Tropfen in einer turbulenten Strömung, Sammelband zur statistischen Theorie der Turbulenz, Hrsg. Herbert Göring, Akademie Verlag Berlin.
- Kraume, M., Gäbler, A., Schulze, K. (2004): Influence of physical properties on drop size distributions of stirred liquid-liquid dispersions, Chem. Eng. Technol. 27 (3) 330-334.
- Lasheras, J.C., Eastwood, C., Martinez-Bazán, C., Montanes, J.L. (2002): A review of statistical models for the break-up of an immiscible fluid immersed into a fully developed turbulent flow, Int. J. Multiph. Flow 28 (2) 247-278.

- Liao, Y., Lucas, D. (2009): A literature review of theoretical models for drop and bubble breakup in turbulent dispersions, *Chem. Eng. Sci.* 64 (15) 3389–3406.
- Maaß, S., Paschedag, A.R., Kraume, M. (2007a): Influence of Electrolytes and Turbulence Parameters on Drop Breakage and Drop Size Distributions in Stirred Liquid/Liquid Dispersions, Proceedings 6th International Conference on Multiphase Flow, 09.-13.07.2007, Leipzig.
- Maaß, S., Gäbler, A., Zaccone, A., Paschedag, A.R., Kraume, M. (2007b): Experimental investigations and modelling of breakage phenomena in stirred liquid/liquid systems, *ChERD* 85 (A5) 703-709.
- Maaß, S., Wollny, S., Sperling, R., Kraume, M. (2009): Numerical and experimental analysis of particle strain and breakage in turbulent dispersions, *ChERD* 87 (4A) 565-572.
- Maaß, S.; Wollny, S.; Voigt, A.; Kraume, M. (2010a): Experimental comparison of measurement techniques for drop size distributions in liquid/liquid dispersions, *Exp. Fluids* 50 (2) 827-838.
- Maaß, S.; Rojahn, J.; Hänsch, R.; Kraume, M. (2010b): Automated drop detection using image analysis for online particle size monitoring in multiphase systems, *Comp. Chem. Eng.* 45, 27-37.
- Maaß, S., Buscher, S., Hermann, S., Kraume, M. (2011a): Analysis of Particle Strain in Stirred Bioreactors by Drop Breakage Investigations, *Biotechnol. J.* 6 (8) 979-992.
- Maaß, S., Paul, N., Kraume, M. (2011b): Influence of dispersed phase fraction on drop sizes in agitated and breakage dominated systems, *Chem. Eng. Sci.* 76, 140-153.
- Maaß, S., Kraume, M. (2011): Determination of breakage rates with single drop experiments, *Chem. Eng. Sci.* 70, 146-164.
- Nachtigall, S., Zedel, D., Maaß, S., Kraume, M. (2012a): Experimentelle Untersuchungen zur Dehnung und zum Zerfall von Tropfen in einem turbulenten Strömungsfeld, *ProcessNet Jahrestreffen der Fachgruppen Mehrphasenströmungen und Mischvorgänge*, Weimar.
- Nachtigall, S., Maaß, S., Kraume, M. (2012b): Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss des Stoffsystems auf den Tropfenzerfall, *ProcessNet Jahrestreffen der Fachgruppe Extraktion und des Fachausschusses Phytoextrakte - Produkte und Prozesse*, Clausthal-Zellerfeld.
- Nachtigall, S., Zedel, D., Maaß, S., Walle, A., Schäfer, M., Kraume, M. (2012c): Determination of drop breakage mechanisms by experimental and numerical investigations of single drop breakages, *Proceedings 14th European Conference on Mixing*, Warszawa.
- Nachtigall, S., Kraume, M. (2013): Einfluss von Geometrie- und Stoffparametern auf den Tropfenzerfall, *ProcessNet Jahrestreffen der Fachgruppen Kristallisation und Mischvorgänge*, Magdeburg.
- Pfennig, A., Schwerin, A. (1998): Influence of electrolytes on liquid-liquid extraction, *Ind. Eng. Chem. Res.* 37 (8) 3180-3188.
- Ramkrishna, D., Mahoney, A. W. (2002): Population balance modeling. Promise for the future, *Chem. Eng. Sci.* 57 (4) 595-606.
- Ritter, J., Kraume, M. (2002): On-line measurement technique for drop size distributions in liquid/liquid systems at high dispersed phase fractions, *Chem. Eng. Tech.* 28 (7).
- Tobin, T., Ramkrishna, D. (1999): Modeling the effect of drop charge on coalescence in turbulent liquid-liquid dispersions, *Can. J. Chem. Eng.* 77 (6) 1090-1104.
- Wulkow, M., Gerstlauer, A., Nieken, U. (2001): Modeling and simulation of crystallization processes using parsival, *Chem. Eng. Sci.* 56 (7) 2575-2588.