MAX-BUCHNER-FORSCHUNGSSTIFTUNG

Jahresbericht zur 1. Förderphase

(01.07.2001 bis 30.06.2002)

Förderprojekt 2228: Elektroextraktion

1 Zielsetzung

Das vorliegende Förderprojekt beschäftigt sich mit der Untersuchung des Einflusses elektrischer Felder (AC und DC) auf den Stoffaustausch in der Extraktion. In der 1. Förderphase wurde die Wirkung elektrischer Felder auf die Hydrodynamik (Tropfengröße und Geschwindigkeit) und den Stoffaustausch betrachtet. Die Experimente erfolgten in Flüssig/Flüssig-Systemen unterschiedlicher Viskosität. Aufbauend auf den experimentellen Ergebnissen der 1. Förderphase ist in der 2. Förderphase eine weitere Quantifizierung des Stoffaustauschs durch Messung der zeitlichen Änderung der mittleren Tropfenkonzentration am bewegten Tropfen sowie von Konzentrationsprofilen mittels Laser Induzierter Fluoreszenz (LIF) geplant. Im Anschluss soll eine theoretische Modellentwicklung folgen.

2 Einleitung

In der Flüssig/Flüssig-Extraktion ist die Erzeugung und Kontrolle einer möglichst großen Stoffaustauschfläche von entscheidender Bedeutung, um eine große Ausbeute und eine gleichbleibende Produktqualität zu erzielen. Die Anwendung elektrischer Feldkräfte als zusätzliche Triebkräfte in der Extraktion führt zu folgenden, den Stoffaustausch begünstigenden Effekten:

1. Das elektrostatische Zerstäuben einer Flüssigkeit verringert bei konstantem Volumenstrom die Tropfengröße, was zu einem vergrößerten Oberflächen:Volumen-Verhältnis und somit zu einer vergrößerten spezifischen Stoffaustauschfläche führt [1, 2].

2. Ein geladener Tropfen wird im elektrischen Gleichspannungsfeld beschleunigt [3, 4]. Es kommt hierbei zu einer Steigerung der Scherkräfte an der Flüssig/Flüssig-Grenzfläche und damit zu einer Verringerung des Grenzflächenfilms auf der kontinuierlichen Seite.

3. Die erhöhte Tropfengeschwindigkeit begünstigt Tropfenoszillationen [5]. Die Tropfenoberfläche wird dadurch ständig erneuert, was ebenfalls zu einem verbesserten Stoffaustausch führt.

4. Es konnte gezeigt werden [6], dass Gleichspannungsfelder im Gegensatz zu Wechselspannungsfeldern die Oberflächenspannung von Öltropfen herabsetzen und sich entsprechend die Tropfengröße verringert. Ausschlaggebend hierfür sind Polarisierungskräfte an der ungeladenen Phasengrenze. Dieser Effekt ist auch auf Flüssig/Flüssig-Systeme übertragbar [7].

5. In Flüssig/Flüssig-Systemen, in denen mindestens eine Phase Ladungsträger enthält, erfolgt ein nahezu instantaner Ladungstransport aus dem Bulk der Flüssigkeit zur Phasengrenze, sobald ein Hochspannungsfeld angelegt wird. Das bestimmende Maß für diesen Ladungstransport ist die Ladungsrelaxationszeit (Verhältnis aus Dielektrizitätskonstante und Leitfähigkeit der Flüssigkeit). Je geringer diese charakteristische Zeit ist, desto schneller kann sich eine Oberflächen- bzw. Grenzflächenladung ausbilden. Für destilliertes Wasser beträgt die Ladungsrelaxationszeit 4 - 5 µs. Die geladene Grenzfläche eines hängenden Tropfens erfährt eine elektrische Kraft im Feld (dies gilt für Gleich- und Wechselspannung), so dass der Tropfen bei der Tropfenbildung früher abgelöst wird als im feldfreien Fall. Hieraus resultieren kleinere Tropfengrößen und die Kräftebilanz am hängenden Tropfen muss um die elektrische Feldkraft erweitert werden[1].

Untersuchungen zum Einfluss elektrischer Felder auf die Hydrodynamik und den Stoffaustausch konzentrieren sich in der Literatur bis jetzt auf die Anwendung von Gleichspannung bzw. Wechselspannung niedriger Frequenz (bis 5 kHz). In der vorliegenden Arbeit wurden zum ersten Mal hochfrequente Wechselspannungsfelder (30 und 45 kHz) auf ihre Wirkung in der Extraktion untersucht. Die verwendete hochfrequente Wechselspannung hat aufgrund des einsetzenden Skin-Effekts zudem den Vorteil des geringeren Gefährdungspotenzials im Vergleich zu einer Gleichspannung bzw. Wechselspannung niedrigerer Frequenz. Im Folgenden sind die Ergebnisse der experimentellen Arbeiten der 1. Förderphase beschrieben.

3 Experimenteller Aufbau

Für die Messung der Tropfengröße und -geschwindigkeit in Flüssig/Flüssig-Systemen sowie die Visualisierung des Stoffaustauschs am Einzeltropfen wurde die in Abb. 1 dargestellte Apparatur aufgebaut. Sie erlaubt sowohl das Dispergieren der organischen in die wässrige Phase, als auch in die umgekehrte Richtung. Die Erfassung der Phänomene erfolgt optisch im Gegenlicht mittels einer Schlierenanordnung. Das Licht einer Nanoblitzlampe (1, 10) (Nanolite/Ministrobokin, HSPS) wird über eine Bi-Konvexlinse (2) auf einen Spalt fokussiert (3), dessen Breite und somit die Lichtintensität einstellbar ist. Eine Plan-Konvexlinse (4) erzeugt anschließend aus dem divergenten Strahlenbündel paralleles Licht, das die Apparatur (5) durchsetzt und anschließend einen Achromat (6) beleuchtet. Der Achromat entwirft ein reelles Bild des Spalts, das auf die scharfe Kante der Schlierenblende (7) abgebildet wird. Jede Störung im parallelen Strahlengang innerhalb der Apparatur, z.B. eine Änderung der Dichte und somit des Brechungsindex durch den übergehenden Stoff, bewirkt eine Ablenkung der Strahlen zu oder weg von der Schlierenblende. Entsprechend erscheinen im CCD-Bild (8, 9) bestimmte Zonen hell oder dunkel.

[1] Oftmals wird diese elektrische Kraft nicht explizit aufgeführt, sondern eine effektive verringerte Grenzflächenspannung definiert, die die elektrischen Größen enthält [8, 9]. An dieser Stelle sollte aber zwischen einer tatsächlichen Verringerung der Grenzflächenspannung (wie unter 4. beschrieben) und der zusätzlich wirkenden elektrischen Feldkraft unterschieden werden.

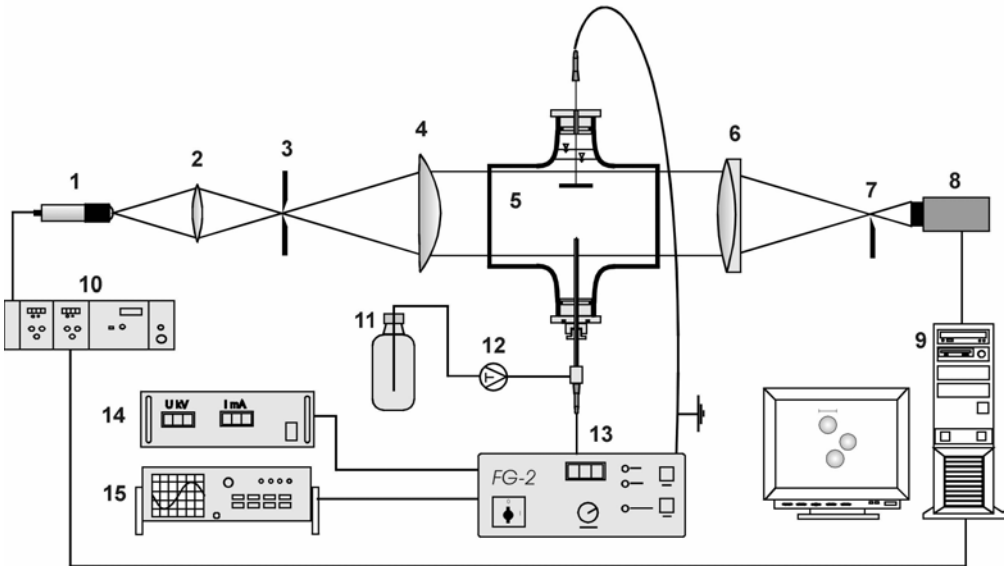

Abb. 1: Experimenteller Aufbau.

Die benötigte Hochspannung wird mittels eines Generators (13) (FG2-2, Ahlbrandt System GmbH) erzeugt, der Wechselspannungen im Bereich von 0 bis 20 kV bei Frequenzen zwischen 30 und 45 kHz liefert. Weiterhin steht ein Gleichspannungsgenerator zur Verfügung, der positive Spannungen bis 50 kV liefert. Die Hochspannung wird zwischen der Kapillarelektrode und der ringförmigen, geerdeten Gegenelektrode angelegt. Gemessen werden Spannung, Strom und Frequenz (14, 15). Die Dispersphase (11) wird über eine Dosierpumpe (12) (Dosimat 725, METROHM) der Kapillarelektrode zugeführt. Die Stoffdaten der verwendeten Flüssig/Flüssig-Systeme sind in Tab. 1 aufgeführt.

Tab.1: Stoffdaten der verwendeten Flüssig/Flüssig-Systeme

Flüssigkeit	Grenzflächen-spannung γ (mN/m)	Dichte ρ (kg/m^3)	Viskosität η (mPas)	Leitfähigkeit κ (µS/cm)
Toluol	33.0 [1)]	867	0.59	< 10^{-8}
Isotridecanol	14.0 [1)]	848	41.9	< 10^{-8}
Siliconöl 550	34.0 [1)]	1060	220.5	< 10^{-8}
Siliconöl DC200	37.8 [1)]	970	1000	< 10^{-8}
Destilliertes Wasser	-	998	0.95	1.5 – 1000 [2)]

[1)] mit destilliertem Wasser
[2)] angepasst mit NaCl

4 Dispergieren der organischen in die wässrige Phase

Beim elektrostatischen Dispergieren der nicht leitenden organischen in die leitende wässrige Phase (κ = 1.5 µS/cm) können unabhängig von der Viskosität monodisperse Tropfen erzeugt werden, deren Größe mit steigender Elektrodenspannung deutlich abnimmt (vgl. Abb. 2). Die elektrische Feldkraft kann an der Tropfenoberfläche in eine tangentiale und eine normale Kom-

ponente zerlegt werden, wobei die normale Komponente immer von der leitenden zur nicht leitenden Phase gerichtet ist (hier von außen ins Tropfeninnere). Der entstehende elektrische Druck führt zu einer Erhöhung des Kapillarinnendrucks, was experimentell bestätigt werden konnte [10]. An der Kapillarspitze ist die Kraftwirkung am stärksten, was eine verstärkte Einschnürung und einen vorzeitigen Abriss des Tropfens bewirkt.

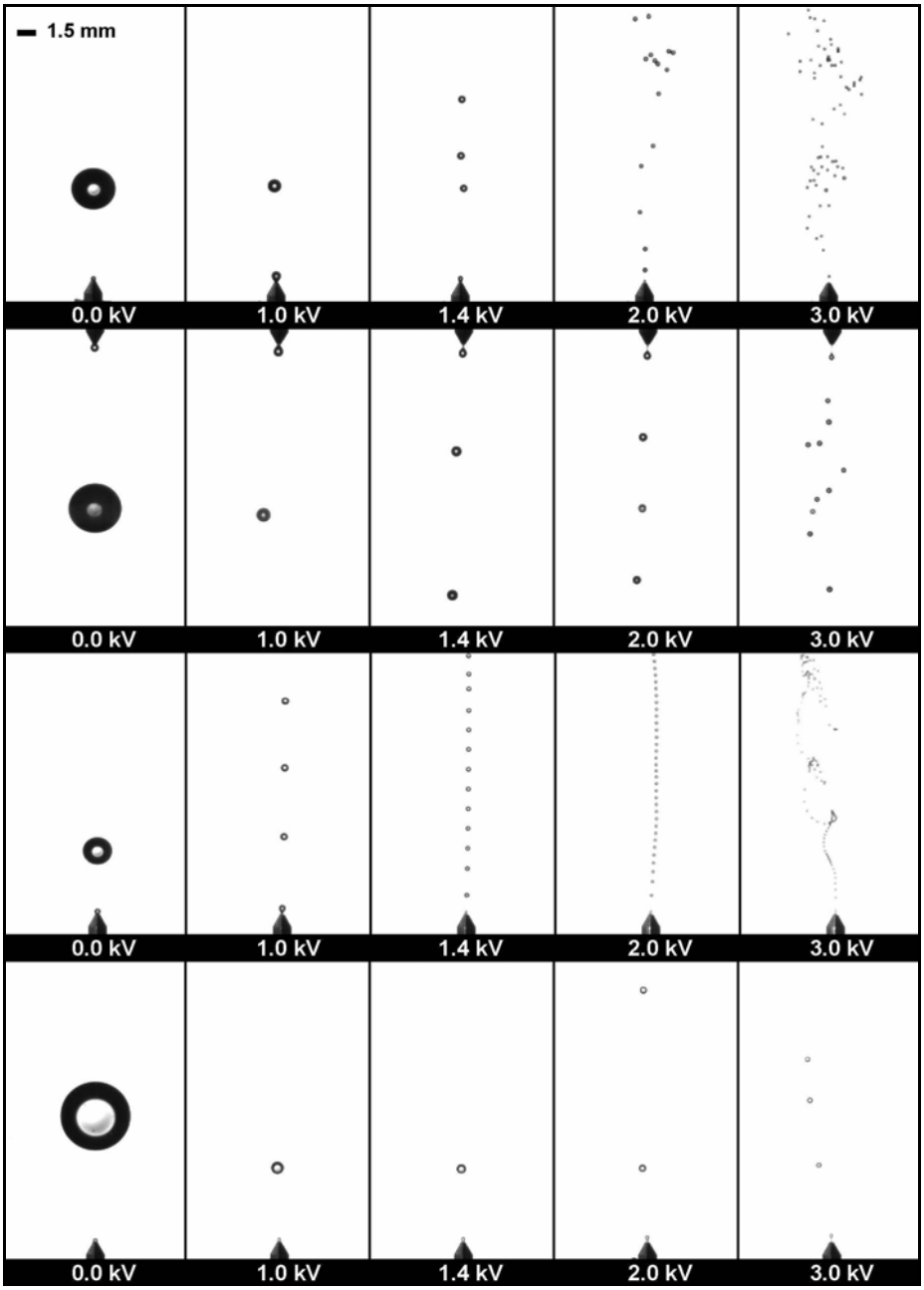

Abb. 2: Elektrostatische Tropfenbildung verschiedener organischer Lösungsmittel in destilliertem Wasser mit steigender Spannung (von oben nach unten: Toluol η = 0.59 mPas; Isotridecanol η = 41.9 mPas; Siliconöl 550 η = 220.5 mPas; Siliconöl DC 200 η = 1000 mPas).

Die Tropfenbildung unter dem Einfluss des elektrischen Feldes lässt sich über eine einfache Kräftebilanz an der Kapillare beschreiben [11, 12]. Für eine Tropfenablösung muss die Grenzflächenspannungskraft überwunden werden. Dieser entgegen wirken die Auftriebskraft aufgrund

der Dichtedifferenz der beiden Medien und die elektrische Feldkraft, die in Gl. (1) als empirischer Term ausgedrückt wurde.

$$\psi \cdot \pi \cdot d_C \cdot \gamma = \Delta\rho \cdot g \cdot \frac{\pi}{6} \cdot d_{32}^3 + \frac{C_1 \cdot d_{32}^{C_2}}{\left(C_3 + d_{32}\right)^{C_4}} \cdot U^{C_5} \,. \tag{1}$$

Die Anpassungsparameter C_1 bis C_5 wurden anhand der experimentellen Daten des Toluol/Wasser-Systems bestimmt. Bei konstanter Elektrodengeometrie, z.B. konische Kapillare, nehmen die Parameter C_1, C_2, C_3 und C_5 konstante Werte an und C_4 variiert linear mit dem Innendurchmesser der Kapillare. Bei Verwendung einer anderen Kapillargeometrie müssen die Modellparameter neu ermittelt werden. Literaturdaten [13] konnten ebenfalls mittels dieser Korrelation beschrieben werden. Die Modellparameter für die konische Kapillare (ID = 0.254 mm), die an die experimentellen Daten des Toluol/Wasser-System angepasst wurden, sind in Abb. 3 dargestellt. Diese Parameter wurden benutzt, um die übrigen Kurvenverläufe vorauszuberechnen. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der experimentellen und berechneten Werte ($R^2 > 0.990$). Mit zunehmender Spannung dominiert die elektrische Feldkraft den Tropfenbildungsprozess. Die anfänglich deutlichen Unterschiede in der Tropfengröße bei 0 kV nehmen mit steigender Spannung ab. Die Kurvenverläufe der unterschiedlichen Stoffsysteme nähern sich einem Grenzwert, der bei 4 kV dem Innendurchmesser der Kapillare entspricht. Die Viskosität als Einflussgröße ist nicht entscheidend für die Tropfengröße.

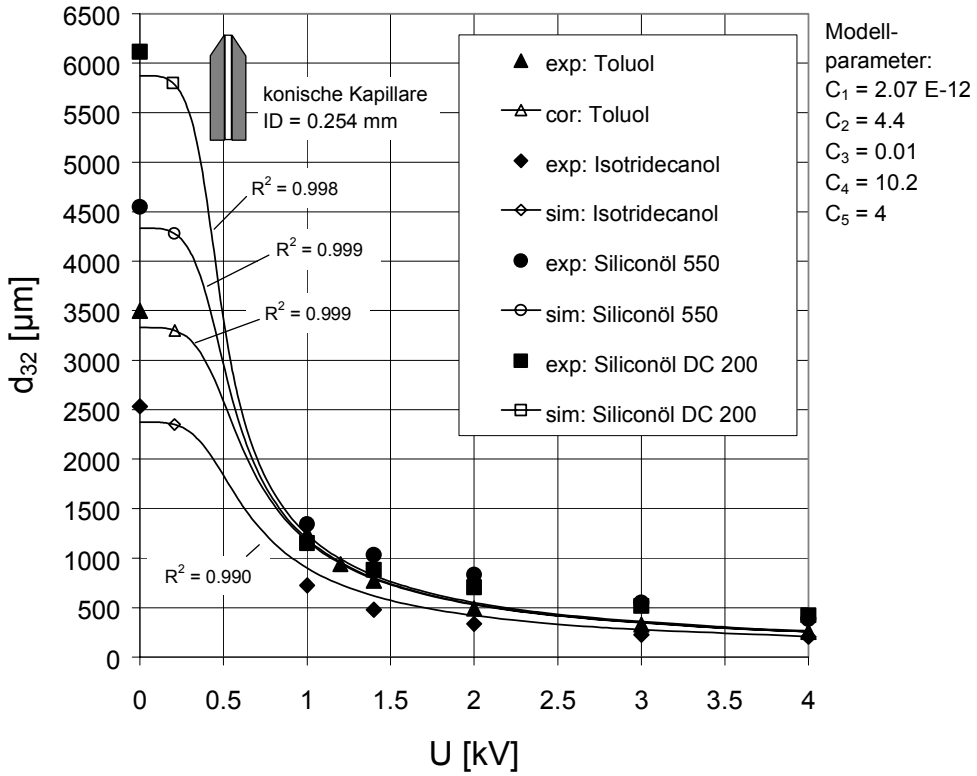

Abb. 3: Sauter-Durchmesser als Funktion der angelegten Elektrodenspannung für verschiedene organische Lösungsmittel in destilliertem Wasser (Volumenstrom: 0.05 ml/min, konische Kapillare ID = 0.254 mm).

5 Dispergieren der wässrigen in die organische Phase

Die umgekehrte Dispergierrichtung zeigt eine deutliche Abhängigkeit des Dispergierergebnisses von der Leitfähigkeit der Dispersphase (vgl. Abb. 4). Hier wirkt die elektrische Feldkraft vom Tropfeninneren nach außen und ist verantwortlich für die verschiedenen Oberflächendeformationen. In der oberen Bildreihe (4a) ist eine Verformung des hängenden Tropfens (destilliertes Wasser κ = 1.5 µS/cm in Toluol) zu erkennen. Der anfänglich runde Tropfen wird mit steigender Spannung in die Länge gestreckt und ist bei 10 kV nach unten zu einer Spitze ausgezogen. Bei noch höheren Spannungen bildet sich ein Flüssigkeitsjet aus, der zu Tropfen zerfällt. Diese Deformation endet bei etwa 20 kV in einer strahlförmig ausgebildeten Flüssigkeitsoberfläche. Die Strahlen stoßen sich aufgrund ihrer elektrischen Aufladung gegenseitig ab und rotieren zusätzlich um die Kapillarachse. Von der Spitze der Strahlen lösen sich Flüssigkeitstropfen ab mit rein stochastischer Verteilung. Insgesamt ist die Tropfenbildung sehr unregelmäßig.

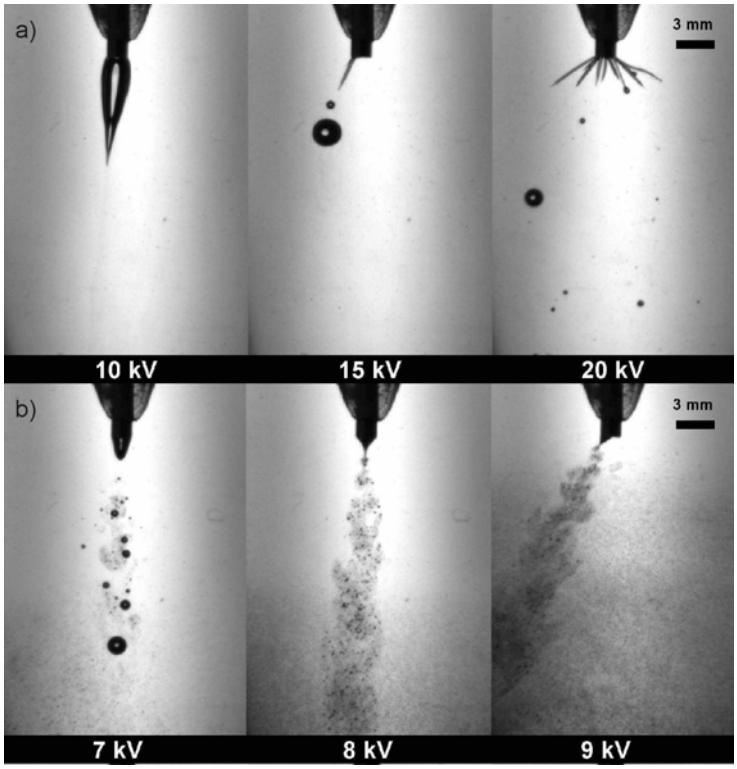

Abb. 4: Dispergieren der wässrigen in die organische Phase bei verschiedenen Spannungen; a) destilliertes Wasser (κ = 1.5 µS/cm) und b) Wasser (κ = 170 µS/cm) in Toluol (flache Kapillare ID = 0.13 mm, Volumenstrom: 0.05 ml/min).

Bei Steigerung der Leitfähigkeit der dispersen Phase auf 170 µS/cm kann eine verbesserte Dispergierung erzielt werden (vgl. untere Bildreihe 4b). Bereits bei 7 kV wird die Flüssigkeit deutlich zerstäubt. Bei 8 kV bildet sich eine stabile konische Flüssigkeitsoberfläche aus (Taylor-Konus), von deren Spitze sich ein polydisperser Flüssigkeitsspray ablöst. Eine monodisperse Einzeltropfenbildung konnte bei dieser Dispergierrichtung und der verwendeten hochfrequenten

Wechselspannung nur bei einer mittleren Leitfähigkeit von etwa 50 – 100 µS/cm in einem eng begrenzten Spannungsbereich (5 – 7 kV) beobachtet werden.

6 Tropfengeschwindigkeiten

Bei der Messung der Tropfengeschwindigkeit im elektrischen Wechselspannungsfeld konnte weder für Toluoltropfen in Wasser noch für Wassertropfen in Toluol eine Beschleunigung festgestellt werden (vgl. Abb. 5 und 6). Die experimentellen Daten können mit Korrelationen aus der Literatur [14] für konstante Tropfenendgeschwindigkeiten beschrieben werden. In beiden Fällen konnte lediglich eine geringe Geschwindigkeitszunahme auf den ersten Zentimetern nach der Tropfenablösung (Anlaufstrecke bis zur konstanten Endgeschwindigkeit im Schwerefeld) detektiert werden. Als Gründe für die fehlende Beschleunigung im elektrischen Wechselspannungsfeld sind zum einen der Ladungsverlust des organischen Tropfens in der gut leitenden wässrigen Phase zu nennen und zum anderen die geringe Tropfengeschwindigkeit im Verhältnis zum hochfrequenten Phasenwechsel, der keine Beschleunigung erlaubt. Ein geladener wässriger Tropfen erfährt im Gleichspannungsfeld hingegen eine Beschleunigung (vgl. Abb. 6).

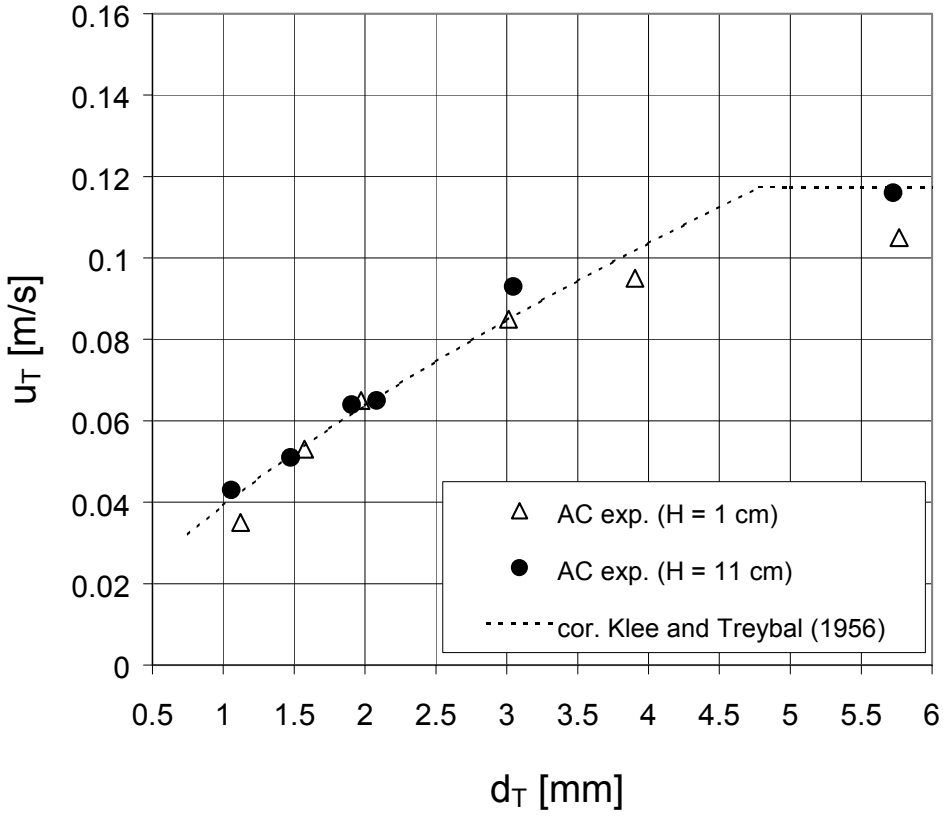

Abb. 5. Tropfengeschwindigkeit als Funktion des Tropfendurchmessers für Toluoltropfen in destilliertem Wasser; Vergleich experimenteller Daten (AC) mit berechneten Daten (Korrelationen von Klee and Treybal [14]) für ungeladene Tropfen.

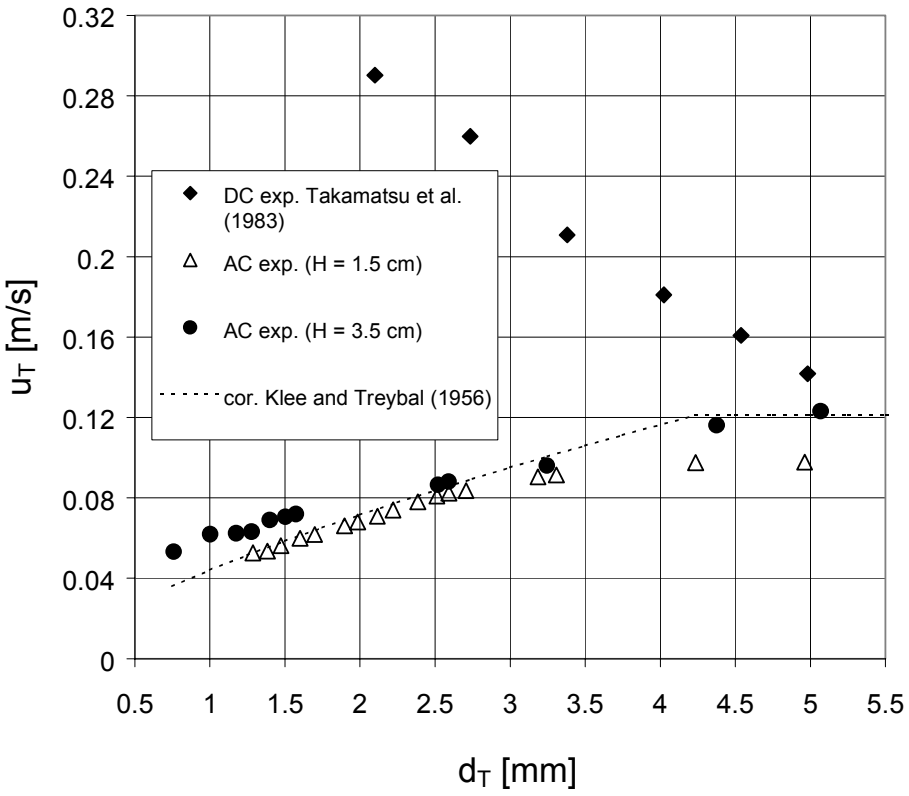

Abb. 6. Tropfengeschwindigkeit als Funktion des Tropfendurchmessers für Wassertropfen in Toluol; Vergleich experimenteller Daten (AC) mit experimentellen Daten von Takamatsu et al. [15] (DC) und berechneten Daten (Korrelationen von Klee and Treybal [14]) für ungeladene Tropfen.

7 Stoffaustausch

Der Stoffaustausch am Einzeltropfen unter dem Einfluss von elektrischen Feldern (AC und DC) wurde im hochviskosen Isotridecanol/Wasser-System mit 1-Propanol als Übergangskomponente untersucht und mit dem feldfreien Fall verglichen. Da die größten Wechselwirkungen und damit auch der größte Einfluss des elektrischen Feldes auf den geladenen Tropfen bei isolierender kontinuierlicher Phase zu erwarten sind, wurden die Experimente am hängenden wässrigen Tropfen durchgeführt. Beide Phasen wurden vor den Experimenten gegenseitig abgesättigt. Nachdem der hängende Tropfen eine bestimmte Größe erreicht hatte, wurde der Volumenstrom gestoppt und Schlieren-Aufnahmen in konstanten Zeitintervallen durchgeführt. Um einen frühzeitigen Tropfenabriss zu vermeiden, wurde die angelegte Spannung auf maximal 2 kV begrenzt.

Entsprechend des Modells von Sternling und Scriven [16] werden konvektive Instabilitäten erwartet, wenn der Stofftransport in die Phase mit dem höheren Diffusionskoeffizienten und der niedrigeren kinematischen Viskosität erfolgt. Hingegen werden keine oder oszillierende Instabilitäten erwartet, wenn der Stofftransport in die Phase mit dem niedrigeren Diffusionskoeffizienten und der höheren kinematischen Viskosität erfolgt. Dieser Sachverhalt kann über folgende Gleichungen ausgedrückt werden, wobei Index ”1” die Abgeberphase und Index ”2” die Aufnehmerphase bedeuten [17]:

Konvektive Instabilitäten: $$\frac{D_1}{D_2} < 1 < \frac{\eta_1 \rho_2}{\eta_2 \rho_1}, \quad (2)$$

keine oder oszillierende Instabilitäten: $$\frac{D_1}{D_2} > 1 > \frac{\eta_1 \rho_2}{\eta_2 \rho_1}. \quad (3)$$

In Abb. 7 ist der Übergang von 1-Propanol mit einer Konzentration von 1 mol/l in einem wässrigen Tropfen in die kontinuierliche Isotridecanol-Phase dargestellt (d ⇨ c). Im feldfreien Fall (linke Spalte) sind wie erwartet keine konvektiven Instabilitäten erkennbar (das System ist stabil). Die hohe Viskosität von Isotridecanol dämpft die Grenzflächenturbulenz und es tritt nur ein Flimmern an der Grenzfläche auf. Nach 30 min ist eine stationäre Diffusionsschicht vollständig ausgebildet.

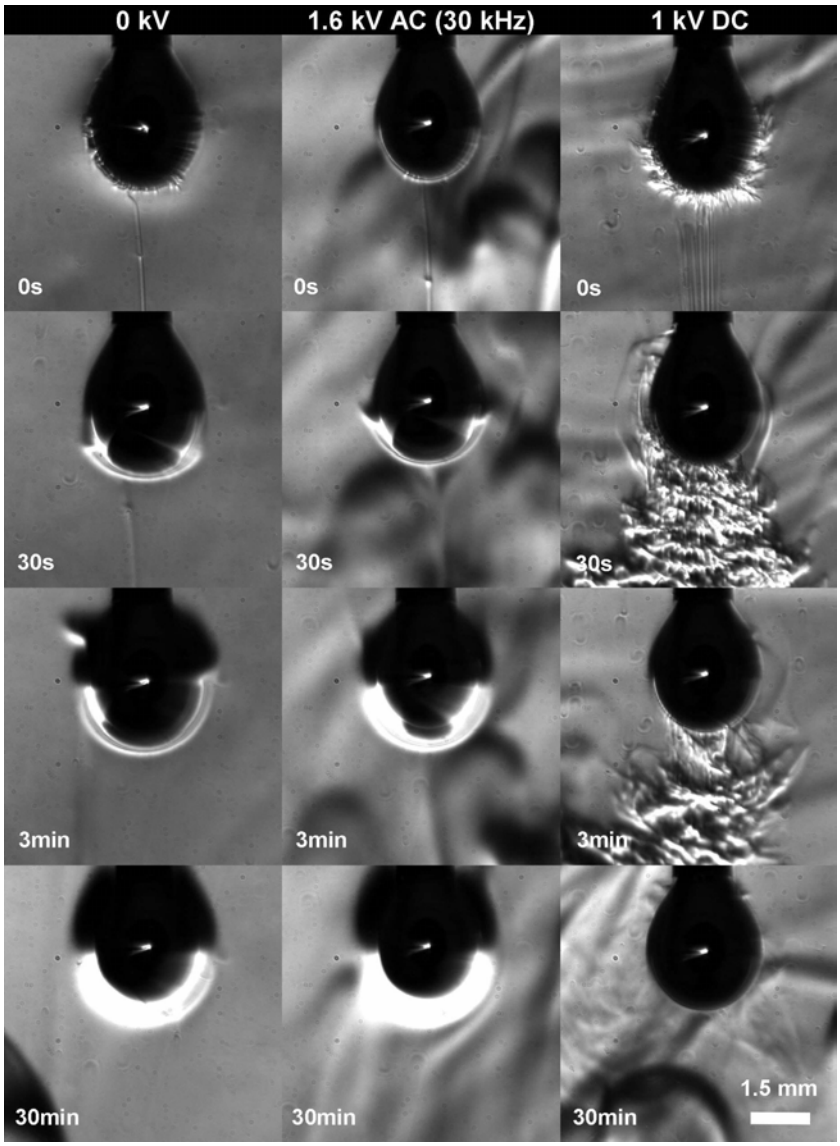

Abb. 7. Übergang von 1-Propanol (1 mol/l) aus einem wässrigen Tropfen (dispers) nach Isotridecanol (kontinuierlich); linke Spalte: 0 kV; mittlere Spalte: 1.6 kV AC (30 kHz); rechte Spalte: 1 kV DC.

Die angelegte Wechselspannung (1.6 kV) (mittlere Spalte) hat keine Auswirkung auf das Stoffaustauschverhalten. Die Schlieren im Tropfenhintergrund entstehen durch den Konzentrationsausgleich in der kontinuierlichen Phase. An der Grenzfläche treten jedoch keine Turbulenzen auf. Bei Verwendung von Gleichspannung (1 kV) (rechte Spalte) sind hingegen starke Grenzflächeninstabilitäten sichtbar, besonders an der Unterseite des Tropfens. Die kurze Ladungsrelaxationszeit von destilliertem Wasser (4 – 5 µs) bewirkt eine nahezu gleichzeitige Ausbildung der Grenzflächenladung. Der Tropfen wird entsprechend der positiven Ladung der Kapillare ebenfalls positiv aufgeladen. Bei einer äquipotenzialen Grenzfläche ist die Feldstärke dort am höchsten, wo der Abstand zur geerdeten Gegenelektrode am kürzesten ist, d.h. an der Tropfenunterseite. Bei Gleichspannung bildet sich keine Diffusionsschicht aus und der Stoffaustausch ist früher abgeschlossen.

In der umgekehrten Stoffaustauschrichtung (c ⇨ d) sind im feldfreien Fall an der Tropfenaußenseite starke Grenzflächeninstabilitäten zu erkennen (das System ist instabil). Anstelle der Eruptionen sind jetzt Irruptionen sichtbar. Nach etwa 30 min ist eine stationäre Diffusionsschicht ausgebildet (vgl. Abb. 8, linke Spalte). Jegliche Bewegung in der Oberfläche der Phasengrenzen dringt in die Phase höherer kinematischer Viskosität tiefer ein und erzeugt daher eine größere Strömung in dieser Phase [18]. Der Antransport erfolgt somit aus weiter entfernten Regionen innerhalb der Isotridecanol-Phase, die entsprechend reicher an Gelöstem (1-Propanol) sind als die grenzflächennahen Schichten. Das größere treibende Konzentrationsgefälle hat einen größeren Grenzflächenspannungsgradienten zur Folge, der die Grenzflächenkonvektion unterstützt. Abweichend zur Stoffaustauschrichtung d ⇨ c ist jetzt auch bei Wechselspannung eine Zunahme der Grenzflächenturbulenz zu erkennen (mittlere Spalte), die sich in der hochviskosen Isotridecanol-Phase über einen größeren Raumbereich erstreckt. Bei Gleichspannung wird wieder eine deutliche Steigerung der Grenzflächeninstabilitäten festgestellt. In beiden Fällen halten die Instabilitäten lange an (> 30min) und es wird keine Diffusionsschicht ausgebildet. Eine Verbesserung des Stoffaustauschs (c ⇨ d) kann anhand dieser Bilder noch nicht abgeleitet werden. Zur weiteren Begründung der Unterschiede im Stoffaustauschverhalten werden Informationen aus dem Tropfeninneren benötigt. Hierzu sind in der 2. Förderphase Stoffaustauschmessungen am Einzeltropfen in einer Tropfensäule mit und ohne Anlegen eines elektrischen Feldes geplant, die Aufschluss über die zeitliche Änderung der mittleren Tropfenkonzentration geben sollen. Ferner ist die Messung von Konzentrationsprofilen am Tropfen mittels Laser Induzierter Fluoreszenz (LIF) geplant.

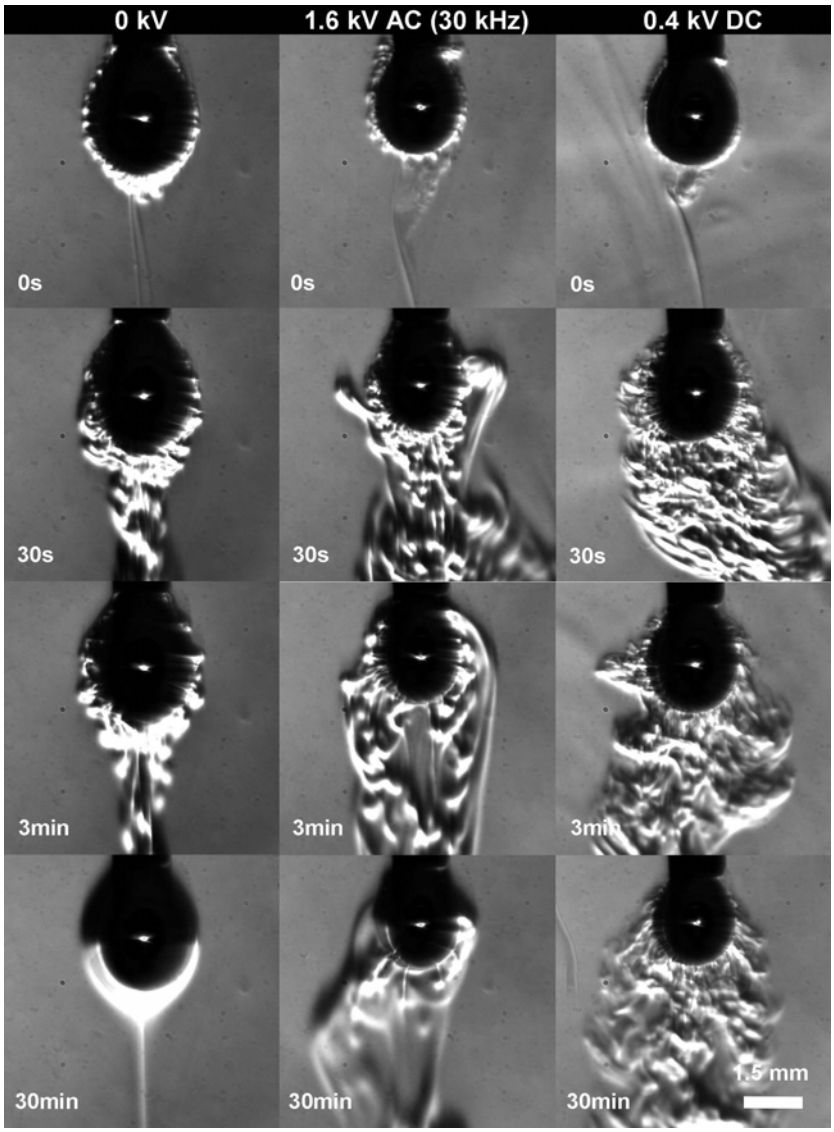

Abb. 8. Übergang von 1-Propanol (1 mol/l) aus Isotridecanol (kontinuierlich) in einen Wassertropfen (dispers); linke Spalte: 0 kV; mittlere Spalte: 1.6 kV AC (30 kHz); rechte Spalte: 0.4 kV DC.

8 Zusammenfassung

In den Experimenten konnte gezeigt werden, dass hochfrequente Wechselspannungsfelder sehr gut geeignet sind, um organische Lösungsmittel in wässriger Phase zu dispergieren. Hierbei ist eine monodisperse Tropfenbildung über einen weiten Tropfengrößenbereich möglich, deren Größe einfach über die angelegte Spannung kontrolliert werden kann. Selbst hochviskose Lösungsmittel lassen sich problemlos dispergieren. Entscheidende Einflussfaktoren auf die Tropfengröße sind die angelegte Spannung und die Kapillarspitzengeometrie. Mittels der entwickelten Korrelation lassen sich die Tropfengrößen in Abhängigkeit von der angelegten Spannung berechnen. Die Dispergierung der gut leitenden wässrigen in die organische Phase ist stark abhängig von der Leitfähigkeit der Dispersphase. Durch Anpassung der Leitfähigkeit der wässrigen Phase auf 100 µS/cm mittels NaCl konnte in einem Spannungsbereich von 5 bis 7 kV eine monodisperse Einzeltropfenbildung erzielt werden. Bei höheren Spannungen und Leitfähigkeiten

bildet sich an der Kapillarspitze ein stabiler wässriger Flüssigkeitskonus aus, von dessen Spitze (Ort der höchsten Feldstärke) ein polydisperser Flüssigkeitsspray ausgeht mit Tropfengrößen deutlich unter 10 µm (geeignet zur Emulgierung).

Abweichend zu den Ergebnissen in einem Gleichspannungsfeld, konnte keine beschleunigte Bewegung wässriger Tropfen mit Wechselspannung gemessen werden. Hierbei entscheidend ist die geringe Tropfengeschwindigkeit im Vergleich zum hochfrequenten Ladungswechsel. Im Falle des organischen Tropfens in wässriger Phase ist aufgrund des Ladungsverlusts in der gut leitenden wässrigen Phase keine Wechselwirkung und somit Beschleunigung des Tropfens möglich.

Mit einer Schlierenapparatur wurde der Stoffaustausch von 1-Propanol zwischen Isotridecanol und Wasser am hängenden wässrigen Tropfen mit und ohne Anlegen eines elektrischen Feldes untersucht. Wird 1-Propanol aus dem Tropfen in die hochviskose Isotridecanol-Phase transferiert (d ⇨ c) können bei Verwendung von Gleichspannung im Vergleich zu Wechselspannung und dem feldfreien Fall Grenzflächeninstabilitäten erzeugt werden. Der Stoffaustausch ist früher abgeschlossen. In der umgekehrten Stoffaustauschrichtung (c ⇨ d) konnte die vorhandene Grenzflächenturbulenz durch Anlegen einer Wechsel- oder Gleichspannung gesteigert werden. Da die Grenzflächenturbulenz sehr lange anhält kann hier jedoch nicht auf eine Verbesserung des Stoffaustauschs geschlossen werden. Für die Erklärung der auftretenden Phänomene sind weitere Experimente erforderlich.

9 Formelzeichen

C_1 - C_5	[-]	Modellparameter
cor	[-]	korreliert
d_C	[m]	Kapillardurchmesser
d_T	[m]	Tropfendurchmesser
d_{32}	[m]	Sauter-Durchmesser
D	[m^2 s^{-1}]	Diffusionskoeffizient
exp	[-]	experimentell
g	[m s^{-2}]	Erdbeschleunigung
ID	[m]	Innendurchmesser der Kapillare
OD	[m]	Außendurchmesser der Kapillare
R^2	[-]	Bestimmtheitsmaß
sim	[-]	simuliert
u_T	[m s^{-1}]	Tropfengeschwindigkeit
U	[kV]	Spannung

griechische Buchstaben

Δ	[-]	Differenz
η	[Pas]	dynamische Viskosität
κ	[S m^{-1}]	Leitfähigkeit
ρ	[kg m^{-3}]	Dichte
γ	[N m^{-1}]	Grenzflächenspannung
τ	[s]	Ladungsrelaxationszeit
ψ	[-]	Harkins-Brown Faktor

Indices

c	[-]	kontinuierliche Phase

10 Veröffentlichungen

G. Gneist, H.-J. Bart, Elektrostatische Tropfenbildung in Flüssig/Flüssig-Systemen, Chem. Ing. Tech. 74 (2002), 274-280.

G. Gneist, H.-J. Bart, Electrostatic drop formation in liquid-liquid systems, Chem. Eng. Technol. (2002), akzeptiert.

G. Gneist, H.-J. Bart, Influence of electric fields on hydrodynamics and mass transfer in solvent extraction, J. Electrostatics (2002), eingereicht.

11 Literaturverzeichnis

[1] **G. Gneist, H.-J. Bart**, Zielgerichtetes Dispergieren mittels hochfrequenter elektrischer Felder in Flüssig/Flüssig-Systemen, Chem. Ing. Tech. 73 (2001), 819-823.

[2] **G. Gneist, H.-J. Bart**, Droplet formation in liquid-liquid systems using high frequency AC fields, Chem. Eng. Technol. 25 (2002), 129-133.

[3] **J.D. Thornton**, The applications of electrical energy to chemical and physical rate processes, Rev. Pure and Appl. Chem. 18 (1968), 197-218.

[4] **P.J. Bailes**, Solvent extraction in an electrostatic field, Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. 20 (1981), 564-570.

[5] **T.C. Scott**, Use of electric fields in solvent extraction: A review and prospectus, Sep. Pur. Methods 18 (1) (1989), 65-109.

[6] **N.A. Efimov, V.A. Zvonov, L.Y. Efimova**, Investigation of the effect of the nature of an applied voltage on the flow of benzine, Electron. Obrab. Mat. 1 (1979), 45-47.

[7] **J.Q. Feng, D.W. DePaoli, C. Tsouris, T.C. Scott**, Spraying fine fluid particles in insulating fluid systems by electrostatic polarization forces, J. Appl. Phys. 78 (4) (1995), 2860-2862.

[8] **G. Stewart, J.D. Thornton**, Charge and velocity characteristics of electrically charged droplets. Part I: Theoretical considerations, I. Chem. E. Symposium Series No. 26 (1967), 29-37.

[9] **M. Yamaguchi**, Electrically aided extraction and phase separation equipment, in: Liquid-Liquid Extraction Equipment, J.C. Godfrey, M.J. Slater (Hrsg.), John Wiley & Sons Ltd. (1994), 585-624.

[10] **C. Tsouris, D.W. DePaoli, J.Q. Feng, O.A. Basaran, T.C. Scott**, Electrostatic spraying of nonconductive fluids into conductive fluids, AIChE J. 40 (11) (1994), 1920-1923.

[11] **G. Gneist, H.-J. Bart**, Elektrostatische Tropfenbildung in Flüssig/Flüssig-Systemen, Chem. Ing. Tech. 74 (2002), 274-280.

[12] **G. Gneist, H.-J. Bart**, Electrostatic drop formation in liquid-liquid systems, Chem. Eng. Technol. (2002), accepted.

[13] **C.H. Byers, J.J. Perona**, Drop formation from an orifice in an electric field, AIChE J. 34 (9) (1988), 1577-1580.

[14] **A.J. Klee, R.E. Treybal**, Rate of rise or fall of liquid drops, AIChE J. 2 (4) (1956), 444-447.

[15] **T. Takamatsu, M. Yamaguchi, T. Katayama**, Terminal velocity of single charged drops through dielectric liquid in a uniform electric field, J. Chem. Eng. Japan 16 (1983), 324.

[16] **C. Sternling, L.E. Scriven**, Interfacial turbulence: Hydrodynamic instability and the Marangoni effect, AIChE J. 5 (1959), 514-523.

[17] **M. Henschke**, Auslegung pulsierter Siebboden-Extraktionskolonnen, Habilitationsschrift, RWTH Aachen (2002).

[18] **H. Sawistowski**, Interfacial Phenomena, in: Recent advances in liquid-liquid extraction, C. Hanson (Hrsg.), Pergamon Press Ltd. (1971), 293-366.