

Schlußbericht für den Zeitraum : 01.07.02 bis 31.10.03

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten Forschungsvorhaben

Forschungsthema : Dimensionierung liegender Flüssig-Flüssig-Abscheider mit Einbauten auf der Basis von Laborversuchen

Aachen, 11.02.04

Ort, Datum

Unterschrift der/des Projektleiter(s)

1	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	3
2	Zielsetzung des Forschungsvorhabens.....	4
3	Experimentelle Arbeiten	5
3.1	Absetzversuche im Labormaßstab.....	6
3.2	Schüttelflasche.....	7
3.2.1	Versuchsaufbau	7
3.2.2	Versuchsdurchführung.....	8
3.3	Rührzelle ohne und mit Einbauten	10
3.3.1	Versuchsaufbau	12
3.3.2	Versuchsdurchführung.....	16
3.3.3	Validierung des Absetzversuchs mit Einbauten	20
3.3.4	Durchgeführte Versuche	24
3.4	Abscheideranlage im Technikumsmaßstab.....	31
3.4.1	Versuchsaufbau	31
3.4.2	Versuchsdurchführung.....	34
3.4.3	Vorversuche.....	41
3.4.4	Durchgeführte Versuche	44
3.5	Verwendete Einbauten.....	57
3.6	Auswahl der Stoffsysteme.....	60
4	Ergebnisse aus Experiment und Modellierung	64
4.1	Heuristische Regeln	64
4.1.1	Auswahl der Einbauten	66
4.1.2	Auswahl des Einbautenmaterials	67
4.2	Short-Cut-Methode.....	68
4.3	Detailliertes Modell.....	77
4.3.1	Modellerweiterungen.....	79
4.3.2	Dispersionstrennung mit Platteneinbauten.....	81
4.3.3	Dispersionstrennung mit Füllkörperpackungen	84
4.4	Auslegungskonzept.....	90
5	Gegenüberstellung Ergebnisse und Zielsetzung.....	93
6	Hinweis auf Förderung	95
7	Anhang.....	96
7.1	Formelzeichen und Abkürzungen.....	96
7.2	Veröffentlichungen	99
7.3	Gewerbliche Schutzrechte	99
7.4	Analytik.....	99
7.5	Materialuntersuchungen.....	99
7.6	Eingesetzte Verteilerlochbleche	101
7.7	Fragebögen zur Auslegung von Abscheidern mit Einbauten	103
7.8	Versuchsprotokolle.....	111
7.8.1	Abscheiderversuche.....	111
7.8.1.1	System Tridecanol + Wasser.....	111
7.8.1.2	System Toluol + Wasser.....	117
7.8.1.3	Systeme n-Butanol + Wasser + NaCl	121
7.8.2	Absetzversuche in der Rührzelle	126

7.8.2.1	System Cyclohexanon + Wasser	126
7.8.2.2	System n-Butanol + Wasser	136
7.8.2.3	System n-Butanol + Wasser + NaCl	142
7.8.2.4	System Toluol + Wasser	147
8	Literaturverzeichnis	148

1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung einer Auslegungsmethode für liegende Flüssig-Flüssig-Abscheider mit Einbauten, die auf geeignete einfache Vorversuche mit dem originalen Stoffsystem gestützt ist.

Es wurde ein Absetzversuch entwickelt, der den von Henschke (1995) vorgestellten konsequent weiterentwickelt. In einem oberen Gefäß wird die Dispersion mit einem Rührsystem kontrolliert erzeugt, anschließend das Absetzverhalten verfolgt und wie bei Henschke ausgewertet. Der Auswertealgorithmus konnte insbesondere durch Berücksichtigung einer anfänglichen Beruhigungszeit deutlich verbessert werden. Nach erneutem Rühren wird die Dispersion in ein zweites, unteres Glasgefäß überführt, das mit Einbauten bestückt ist. In diesem Gefäß kann dann die Beschleunigung des Absetzvorganges durch die Einbauten quantifiziert werden.

Parallel wurden Versuche in einem Abscheider im Technikumsmaßstab durchgeführt. Insbesondere wurden auch ein System mit einer hochviskosen Phase und eines mit langer Absetzzeit, die durch Zugabe von Salz eingestellt wurde, untersucht.

Als ein wesentliches Ergebnis zeigt sich, dass die Verkürzung der Trennlänge im Abscheider aufgrund der Einbauten mindestens der Beschleunigung der Absetzzeit im Absetzversuch entspricht. So wurde eine einfache Auslegungsmöglichkeit für liegende Abscheider mit Einbauten geschaffen. Eine weitergehende Modellierung der Absetzversuche mit Einbauten wurde für unterschiedliche Geometrien durchgeführt. Dabei zeigt sich einerseits, dass diese Modelle sehr spezifisch für die jeweilige Geometrie sind. Andererseits können diese Ergebnisse nicht ohne detaillierte Beschreibung der Strömung der Dispersion in den Einbauten für die Abscheiderauslegung genutzt werden. Eine solche Beschreibung einer Dispersionsströmung ist heute allerdings noch nicht mit relevanter Genauigkeit möglich.

Zur Unterstützung der Einbautenauswahl wurden heuristische Regeln zusammengetragen. Basis waren Angaben aus der Literatur, aus Fragebögen, die bei den Projektbegleitern und darüber hinaus verteilt wurden, sowie Ergebnisse dieser Arbeit.

Damit wurde das Ziel des Projektes erreicht, eine solide Basis für die Auslegung von liegenden Abscheidern mit Einbauten zu schaffen.

2 Zielsetzung des Forschungsvorhabens

Das Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung einer neuen Auslegungsmethode für liegende Flüssig-Flüssig-Abscheider mit Einbauten. Die Grundlage der Auslegungsmethode sollen Heuristiken bilden, die eine Vorauswahl der Einbauten anhand der für ein Trennproblem vorliegenden Daten und Randbedingungen erlauben und den Umfang der durchzuführenden Vorversuche festlegen. Eine Short-Cut-Methode soll dann erlauben, anhand der Daten aus den durchgeführten Laborversuchen die notwendige Trennlänge des Abscheiders mit Einbauten abzuschätzen. Eine detailliertere Auswertung der Laborversuche soll anschließend die Parameter, die das Stoffsystem liefern und die Einbautenwirkung charakterisieren. Die Parameter sollen in ein detailliertes physikalisches Modell eingehen, das eine genauere Beschreibung der Dispersionstrennung im Abscheider mit Einbauten zulässt. Short-Cut-Methode und detailliertes Modell umfassen insbesondere längsangeströmte Plattenpakete und Füllkörperpackungen.

Für die Entwicklung der Auslegungsmethode war zunächst die Entwicklung aussagekräftiger Laborversuche notwendig, die eine Untersuchung des Einbauteneinflusses auf die Dispersionstrennung ermöglichen. Mit dem Absetzversuch ohne Einbauten in der Rührzelle nach Henschke (1995) steht bereits ein Laborversuch zur Verfügung, aus dem ein stoffsystemspezifischer Parameter ermittelt und damit nachfolgend ein Abscheider ohne Einbauten ausgelegt werden kann. Ausgehend vom diesem Rührzellenversuch sollte ein Absetzversuch konzipiert werden, bei dem neben dem originalen Stoffsystem auch beliebige originale Einbauten eingesetzt werden können.

Zur Erweiterung der experimentellen Datenbasis sollten weitere Untersuchungen an der vorhandenen Abscheideranlage im Technikumsmaßstab durchgeführt werden. Neben weiteren Stoffsystemen lag hier der Schwerpunkt auf der Variation der Einflussgrößen Lochblechgeometrie, Dispersionserzeugung, Plattenwerkstoff und Plattenabstand, wobei hier insbesondere große Plattenabstände bis 46 mm von Interesse waren. Zudem sollten Füllkörperpackungen beispielhaft im liegenden Abscheider eingesetzt werden.

3 Experimentelle Arbeiten

Der zentrale Bestandteil der experimentellen Arbeiten war die Durchführung von Laborversuchen, im Bereich der Dispersionstrennung insbesondere diskontinuierliche Absetzversuche ohne und mit Einbauten. Absetzversuche ohne Einbauten dienten dabei im wesentlichen der Charakterisierung der Koaleszenzeigenschaften der Stoffsysteme und damit auch einer Kontrolle der Stoffsystemqualität. Koaleszenz hängt wesentlich von den Wechselwirkungen zwischen den beteiligten Phasengrenzen ab. Diese Wechselwirkungen werden durch das Wechselspiel zwischen anziehenden Van-der-Waals-Kräften, die durch die Hamaker-Konstante charakterisiert werden, und abstoßenden elektrostatischen Kräften bestimmt. Das Wechselspiel kann z.B. mit der DLVO-Theorie zumindest qualitativ beschrieben werden (vgl. z.B. Pfennig, 2004). Zur quantitativen Modellierung fehlen in technisch relevanten Systemen praktisch immer die notwendigen physikalischen Grunddaten. Die elektrostatischen Kräfte zwischen den sich annähernden Phasengrenzen werden nun durch ionische Spezies und ganz besonders durch ionische Tenside nachhaltig beeinflusst, wenn diese auch nur in Spuren vorliegen. Dies hat zur Konsequenz, dass das Koaleszenzverhalten bereits bei Konzentrationen von Verunreinigungen beeinflusst wird, bei denen die Grenzflächenspannung, die üblicherweise als Kenngröße für Grenzflächeneigenschaften angesehen wird, noch völlig unverändert zum reinen System ist. Diese Zusammenhänge sind zwar bei den Kolloidchemikern bereits seit vielen Jahren bekannt, im Bereich der Verfahrenstechnik setzt sich dieses Wissen mit allen Konsequenzen allerdings erst in jüngster Zeit durch.

Um die Wirkung von Einbauten auf die Dispersionstrennung im Labormaßstab untersuchen zu können, wurde zudem ein Absetzversuch mit Einbauten entwickelt und erprobt. Er dient insbesondere der Untersuchung der Einbautenwirkung auf die Dispersionstrennung und bildet damit eine wesentliche Grundlage bei der Entwicklung eines Auslegungsmodells für Abscheider mit Einbauten. Neben den Laborversuchen wurde die experimentelle Datenbasis durch weitere Versuche an der bereits vorhandenen und bewährten Abscheideranlage im Technikumsmaßstab erweitert. In diesem Abschnitt werden Versuchsaufbau und -durchführung der verschiedenen Labor- und Technikumsversuche vorgestellt und die in den Versuchen eingesetzten Einbauten charakterisiert.

3.1 Absetzversuche im Labormaßstab

Die Durchführung eines diskontinuierlichen Absetzversuchs erfordert zunächst die Erzeugung einer Dispersion durch intensives Vermischen der Phasen eines Stoffsystems. Am einfachsten lässt sich diese Vermischung durch kräftiges Schütteln eines verschließbaren Standzylinders erreichen, der mit den flüssigen Phasen gefüllt ist. Gut geeignet zur Erzeugung von Dispersionen sind auch Rührwerke und statische Mischer. Beim Betrieb kontinuierlicher Abscheider können diskontinuierliche Absetzversuche direkt durch Entnahme der Dispersion aus dem laufenden Prozess an einer Zapfstelle durchgeführt werden.

Abb. 3-1 zeigt exemplarisch den zeitlichen Verlauf eines diskontinuierlichen Absetzversuchs (Henschke, 1995). Der Absetzversuch wird mit dem Unterbrechen des Vermischens der flüssigen Phasen begonnen. Nach dem Abbau eventueller anfänglicher Turbulenzen beginnen die Tropfen der dispersen Phase in Richtung der Phasengrenze zu sedimentieren. Im gezeigten Beispiel liegt die spezifisch schwere Phase dispers vor, so dass die Tropfen nach unten sinken. Dieser Vorgang wird durch die Sedimentationskurve beschrieben. Häufig ist die Sedimentationsgeschwindigkeit der Tropfen höher als die Geschwindigkeit, mit der die Tropfen an der Phasengrenze koaleszieren. Es kommt dann zur Bildung einer dichtgepackten Tropfenschicht. Bei der dichtgepackten Schicht handelt es sich um übereinandergeschichtete Tropfen, die sich untereinander durch Tropfen-Tropfen-Koaleszenz (TTK) vereinigen. Gleichzeitig werden im Bereich der Phasengrenzfläche Tropfen der dichtgepackten Schicht durch Tropfen-Grenzflächen-Koaleszenz (TGK) in ihre kohärente Phase überführt. Die zeitliche Lage der Phasengrenzfläche wird durch die Koaleszenzkurve beschrieben. Zum Zeitpunkt t^* ist die Sedimentation der Tropfen abgeschlossen. Es erfolgt nun noch der vollständige Abbau der restlichen dichtgepackten Schicht. Ist die disperse Phase vollständig in ihre kohärente Phase überführt, so ist der Absetzvorgang abgeschlossen. Man bezeichnet die Zeit von der Beendigung des Mischvorgangs bis zu diesem Zeitpunkt t_{Σ} als Absetzzeit.

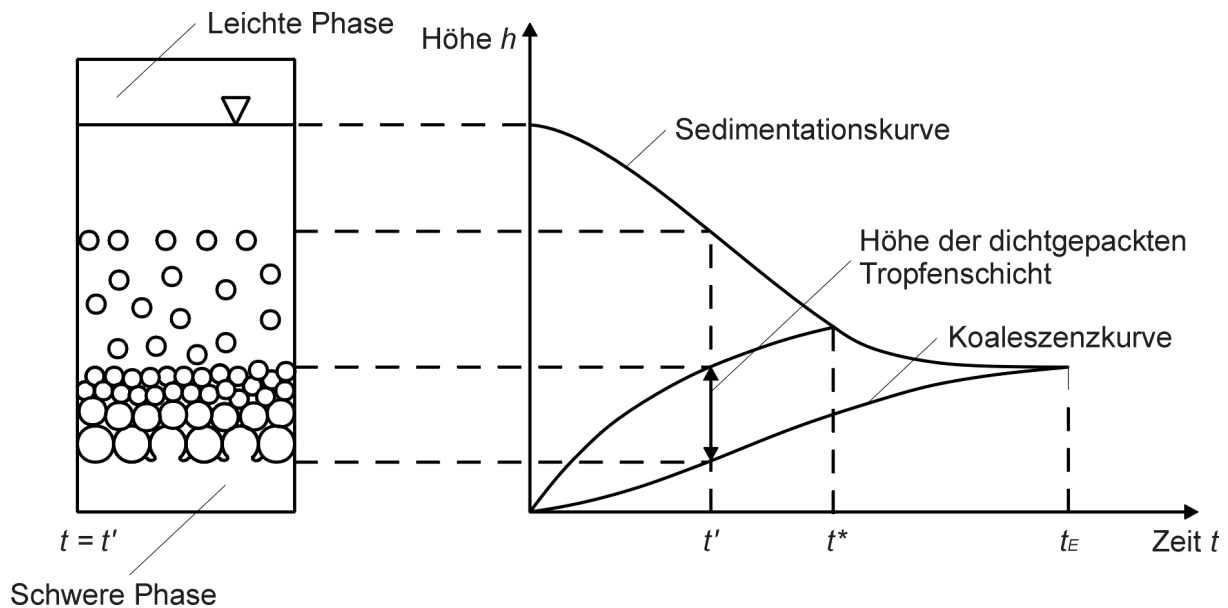


Abb. 3-1: Zeitlicher Ablauf eines diskontinuierlichen Absetzversuchs

Als reproduzierbares Ende des Absetzversuchs wurde der Zeitpunkt festgelegt, an dem die letzte Tropfenschicht nur noch die Hälfte der Phasengrenze bedeckt und die andere Hälfte als klare Grenzfläche ohne Tropfen zu erkennen ist (Henschke, 1995). Durch diese Festlegung wird vermieden, dass sich durch mitunter stochastisches Koaleszenzverhalten von Einzeltropfen große Abweichungen in der Dauer der Absetzzeit bei identischen Versuchsbedingungen ergeben.

Im folgenden werden Versuchsaufbau und -durchführung der verschiedenen diskontinuierlichen Absetzversuche erläutert und jeweils exemplarische Ergebnisse vorgestellt.

3.2 Schüttelflasche

3.2.1 Versuchsaufbau

Die einfachste Form des Absetzversuchs wird in einer Schüttelflasche durchgeführt, die mit dem jeweiligen Stoffsystem befüllt ist. Die Dispergierung des Stoffsystems erfolgt dabei durch kräftiges Schütteln der Flasche. Beim nachfolgenden Absetzvorgang wird in der Regel nur die Absetzzeit ermittelt und auf eine Auswertung der Absetzkurven verzichtet. Der Absetzversuch in der Schüttelflasche liefert in Form der Absetzzeit bei einer geringen Versuchsdauer aussagekräftige Informationen über die Qualität eines Stoffsystems. Durch die Zugabe entsprechender Materialproben in die Schüttelflasche kann er auch zur Untersuchung der Materialbeständigkeit gegenüber

dem jeweiligen Stoffsystem genutzt werden. Kleinste Spuren insbesondere grenzflächenaktiver Komponenten, die aus einem Material, z. B. einem Kunststoff, herausgelöst werden, können die Absetzzeit sehr deutlich beeinflussen. Die verwendeten Schüttelflaschen, handelsübliche Rollflaschen mit planem Boden, haben einen Innendurchmesser von 50 mm, eine Füllhöhe von 120 mm und damit ein Gesamtvolumen von 235 ml.

3.2.2 Versuchsdurchführung

Die Schüttelflasche wird mit dem Stoffsystem befüllt und vor der Messung in einem Thermostaten auf die gewünschte Temperatur gebracht. Während der Temperierung wird die Flasche regelmäßig geschüttelt, um eine gleichmäßige Temperierung und Equilibrierung des Stoffsystems zu erreichen. Die Dispergierung erfolgt durch kräftiges Schütteln der Flasche von Hand, wobei dieser Vorgang etwa 30 s andauert. Anschließend wird die Flasche senkrecht abgestellt und der Absetzvorgang beobachtet. Als Messwert wird die Absetzzeit entsprechend der Definition aus 3.1 aufgenommen.

Der Absetzversuch in der Schüttelflasche wird zur Überprüfung der Stoffsystemqualität verwendet. Zu Beginn einer Versuchsreihe oder eines Versuchstags wird eine frische Probe der Versuchsflüssigkeiten entnommen und in der Schüttelflasche untersucht. Übersteigt die gemessene Absetzzeit eine kritische Absetzzeit, müssen die Versuchsflüssigkeiten ausgewechselt und erneuert werden. Die kritische Absetzzeit ist stoffsystemabhängig und wird aus Absetzversuchen mit frischen Versuchsflüssigkeiten zuzüglich einer Toleranz von etwa 15 % bestimmt. Die kritischen Absetzzeiten für die verwendeten Stoffsysteme sind in Tab. 3-1 aufgeführt. Wird die Absetzzeit der fortlaufenden Versuche über der Versuchszeit aufgetragen, können eventuelle Änderungen oder Verunreinigungen des Stoffsystems sehr leicht bestimmten Ereignissen, z. B. einem Einbautenwechsel, zugeordnet werden (siehe Abb. 3-2).

Stoffsystem Wasser +	Kritische Absetzzeit
Cyclohexanon	40 s
n-Butanol	35 s
Toluol	25 s
n-Butanol + NaCl	95 s

Tab. 3-1: Kritische Absetzzeiten der verwendeten Stoffsysteme

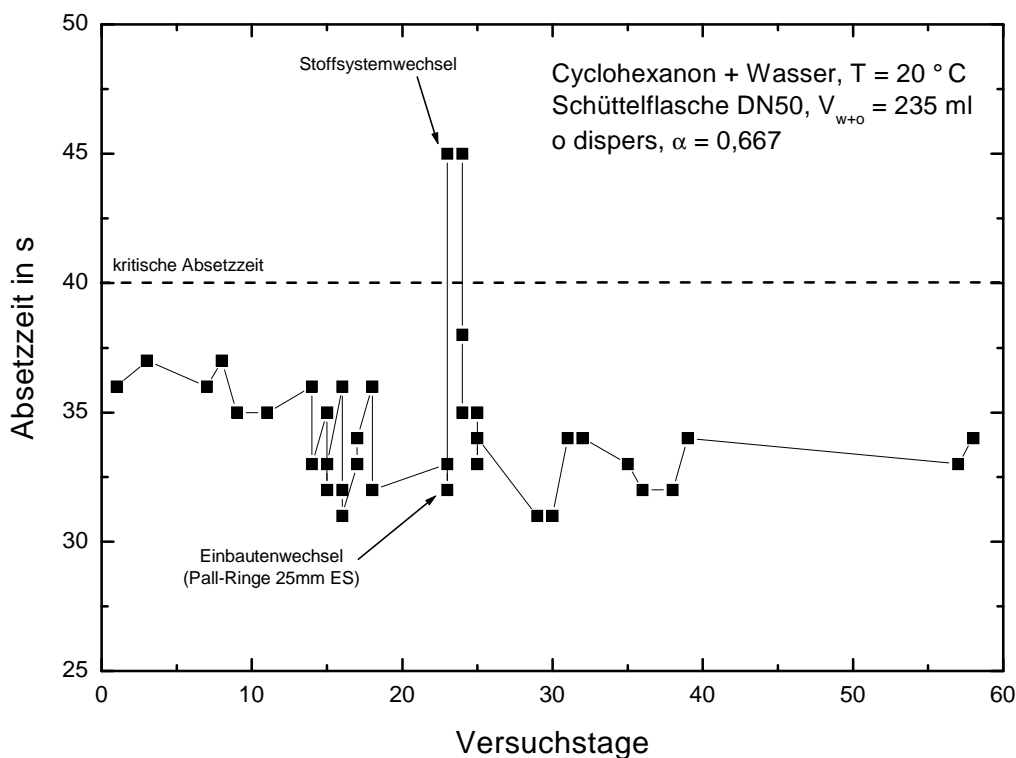


Abb. 3-2: Überprüfung der Stoffsystemqualität anhand eines Absetzversuchs

Mit dem Absetzversuch in der Schüttelflasche kann zudem die Beständigkeit eines Werkstoffs gegenüber einem bestimmten Stoffsystem untersucht werden. Nach der Durchführung eines Absetzversuchs mit frischen Versuchsflüssigkeiten wird eine Probe des Werkstoffs in die Schüttelflasche gegeben. Nach Ablauf eines gewünschten Zeitraums von z. B. einem Tag wird die Werkstoffprobe entnommen und der Absetzversuch wiederholt. Eine Änderung des Koaleszenzverhaltens durch eine Unbeständigkeit des Werkstoffs gegenüber dem Stoffsystem zeigt sich dabei durch eine verlängerte Absetzzeit. Ergebnisse zu Beständigkeitsversuchen mit verschiedenen Einbautenwerkstoffen befinden sich im Anhang 7.5 (siehe Abb. 7-1).

3.3 Rührzelle ohne und mit Einbauten

Zur Durchführung diskontinuierlicher Absetzversuche wurde am Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik eine Rührzelle entwickelt, der gegenüber dem Absetzversuch in der Schüttelflasche eine gleichmäßigere und reproduzierbarere Dispersionserzeugung ermöglicht (siehe Abb. 3-3). Die Rührzelle hat sich als geeignet erwiesen, diskontinuierliche Absetzversuche als Basis zur Auslegung kontinuierlicher Schwerkraftabscheider ohne Einbauten durchzuführen (Henschke, 1995). Eine detaillierte Konstruktionsbeschreibung der Rührzelle befindet sich bei Borgmann (1995).

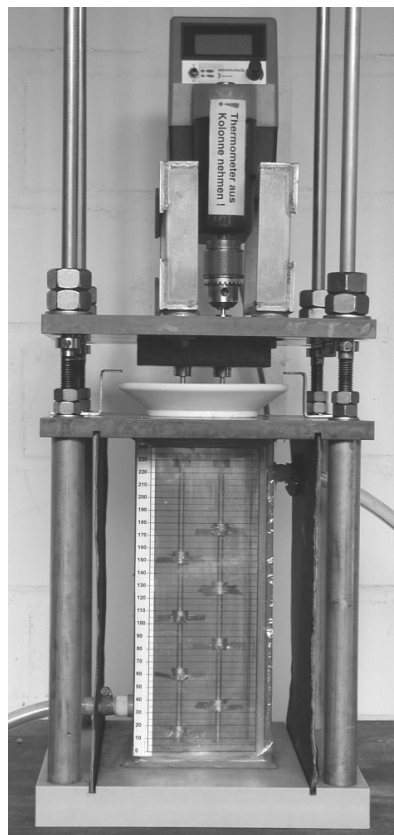


Abb. 3-3: Rührzelle für Absetzversuche ohne Einbauten

Die Konstruktion der Rührzelle nach Henschke bedingt, dass die Dispersionserzeugung und der eigentliche Absetzversuch in demselben Behälter durchgeführt werden müssen. Daher ist es mit dem bisherigen Versuchsaufbau nicht möglich, Einbauten in den Absetzversuch einzubringen, um so den Einfluss der Einbauten auf die Dispersionsstrennung untersuchen zu können. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ein neuer Absetzversuch entwickelt, in dem neben dem originalen Stoffsystem auch die originalen Einbauten verwendet werden.

Die grundlegende Idee des neuen Absetzversuchs und der wesentliche Unterschied zur bisher eingesetzten Rührzelle besteht in der räumlichen Trennung von Dispersionserzeugung und Absetzvorgang. Dadurch ist es möglich, diskontinuierliche Absetzversuche mit beliebigen Einbauten durchzuführen, die in einem separaten Absetzbehälter angeordnet werden.

In der Literatur findet man bei Hartland et al. (1988, 1998) erste Ansätze zu Versuchsanordnungen mit Übertragung einer Dispersion aus einem Rührgefäß in einen Absetzbehälter. Sie benutzen zur Dispersionserzeugung eine Rührzelle, die aus einem Glasbehälter mit eingebauten Strombrechern besteht. Als Dispergierorgan wird ein 6-Blatt-Scheibenrührer verwendet. Ein Abfluss am Boden des Rührbehälters wird mit Hilfe eines Stöpsels zunächst verschlossen. Durch Herausziehen des Stöpsels gelangt die erzeugte Dispersion dann in einen tiefer angeordneten Absetzbehälter.

Ein Laborversuch zur Durchführung von diskontinuierlichen Absetzversuchen muss bestimmte Anforderungen erfüllen, um reproduzierbare und aussagekräftige Ergebnisse liefern zu können (Borgmann, 1995):

1. Das erzeugte Tropfenspektrum soll möglichst eng sein.
2. Bei der Dispersionserzeugung durch Rühren darf keine Luft in die Flüssigkeit eingerührt werden, da Luftbläschen die Absetzeigenschaften der Dispersion verändern.
3. Ein Rotieren der Flüssigkeit nach Abstellen der Rührorgane muss vermieden werden, da sonst die Sedimentation der Tropfen behindert wird.
4. Verunreinigungen des Stoffsystems sind unbedingt zu vermeiden, deshalb müssen alle Teile, die mit dem Stoffsystem in Berührung kommen, aus chemisch beständigen, inerten Materialien bestehen.
5. Eine Temperierung des Stoffsystems auf eine konstante Temperatur ist aus Gründen der Reproduzierbarkeit der Versuche wünschenswert.

Durch die Erweiterung des Versuchsaufbaus um einen separaten Absetzbehälter und die damit verbundene Übertragung der Dispersion durch eine Falleitung muss der neue Laborversuch zusätzlich folgende Anforderungen erfüllen (Freitag, 2003):

1. Durch die Übertragung darf das Tropfenspektrum der Dispersion nicht verändert werden.
2. Während der Übertragung der Dispersion darf keine Koaleszenz stattfinden.
3. Im Rührbehälter des neuen Absetzversuchs entsteht durch die Flanschverbindung zum Kugelhahn ein gegenüber dem einfachen Rührzelle zusätzliches Flüssigkeitsvolumen von etwa 100 ml. Die Flüssigkeit darin muss beim Rührvorgang mitvermischt werden.

3.3.1 Versuchsaufbau

Abb. 3-4 zeigt schematisch den Grundaufbau der Anlage. Der neue Laborversuch besteht aus einer Rührzelle (Mixer), in der die Dispersion erzeugt wird, und einem unterhalb der Rührzelle angeordneten Absetzbehälter (Settler), in dem der eigentliche Absetzversuch mit Einbauten durchgeführt wird. Die Behälter sind durch einen Kugelhahn miteinander verbunden. Nach Beendigung eines Versuches kann die Flüssigkeit aus dem Absetzbehälter in ein Auffanggefäß abgelassen werden.

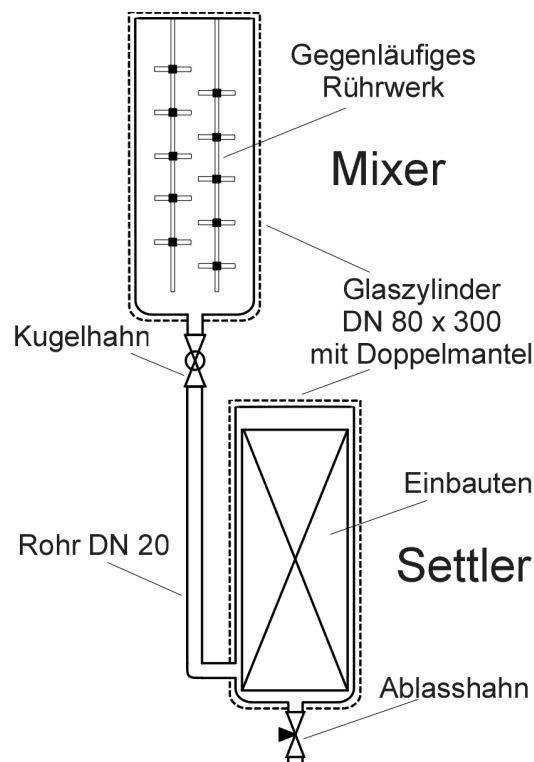


Abb. 3-4: Schematischer Aufbau des Absetzversuchs mit Einbauten

Im neuen Laborversuch kann wie bisher ein Absetzversuch ohne Einbauten in der Rührzelle durchgeführt werden. Die räumliche Trennung von Dispersionserzeugung und Absetzbehälter erlaubt nun zudem die Durchführung eines Absetzversuchs mit verschiedenen Einbauten im Settler mit demselben Stoffsystem. So kann der Einfluss der Einbauten auf die Dispersionstrennung ohne etwaige Stoffsystemänderungen und -verunreinigungen untersucht werden.

Rührzelle (Mixer)

Die zur Dispersionserzeugung verwendete Rührzelle ist in weiten Teilen identisch mit der Rührzelle nach Henschke. Der wesentliche Unterschied zwischen neuer und alter Rührzelle besteht darin, dass bei der neuen Rührzelle eine Möglichkeit zur Übertragung der erzeugten Dispersion in den Absetzbehälter geschaffen wurde. Der Aufbau der Rührzelle ist in Abb. 3-5 dargestellt.

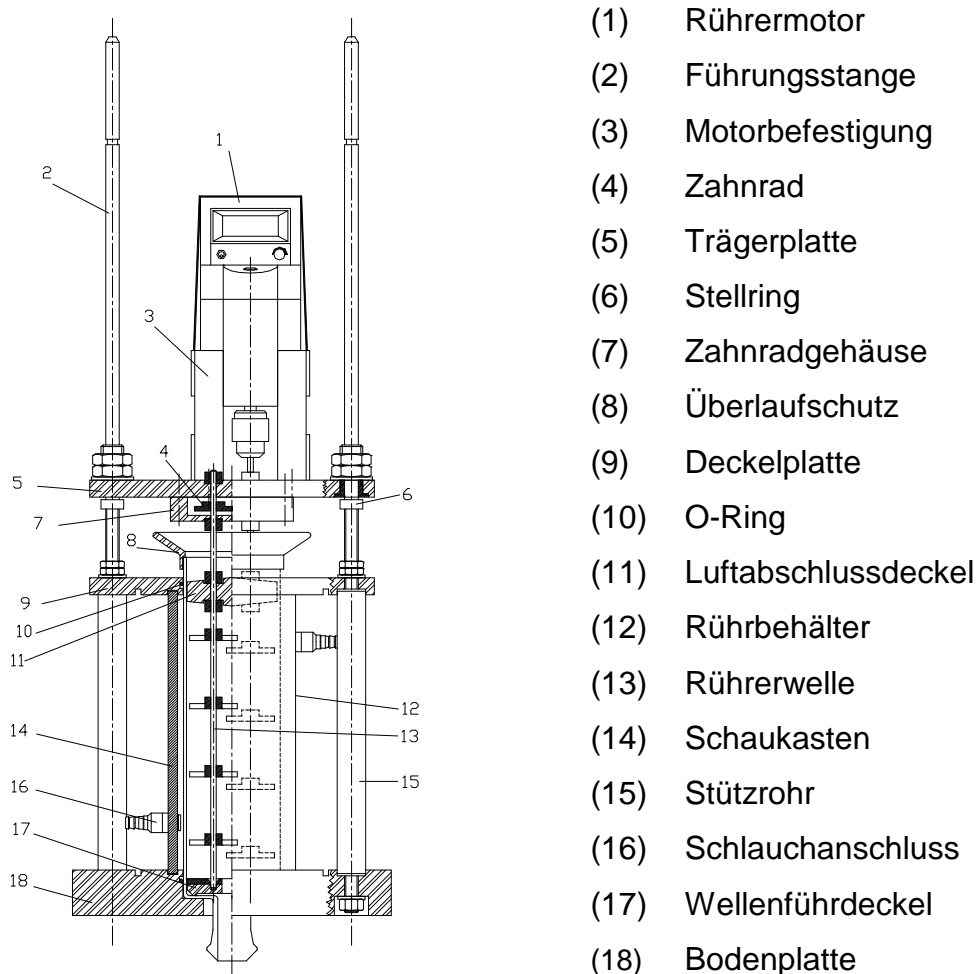


Abb. 3-5: Rührzelle mit Übertragungsmöglichkeit (Mixer)

Zentraler Bestandteil der Rührzelle ist ein zylindrischer Glasbehälter (12) mit einem Nenndurchmesser von 80 mm (DN 80) und einer Höhe von 300 mm. Er dient als Rührbehälter, in dem die Dispersion erzeugt wird. Die Dispersionserzeugung erfolgt durch zwei gegenläufig rotierende Rührerwellen (13), auf denen mit Hilfe von Stellringen (6) jeweils 4 Schrägblattrührer mit je 4 Rührerblättern angeordnet sind. Untersuchungen haben gezeigt, dass Schrägblattrührer gut geeignet sind, um ein homogenes Tropfenspektrum zu erzeugen (Freitag, 2003). Die Wellen sind im oberen Teil innerhalb eines Getriebegehäuses (7) mittels zweier Zahnräder (4) verbunden und werden am Boden des Glaszylinders in einem Wellenführdeckel (17) geführt. Eine der Wellen wird durch einen Motor (1) (Typ Eurostar Power control-visc, 130 W, 230 V, 50 Hz, 50-2000 min⁻¹, Firma IKA, Staufen) angetrieben, dessen Drehzahl stufenlos einstellbar ist. Die gegenläufige Rotation der Wellen und der Einsatz eines Luftabschlussdeckels (11) verhindert das Entstehen einer Trombe beim Rühren und macht weitere Einbauten wie Strombrecher überflüssig.

Als Trägerkonstruktion dienen zwei quadratische Platten aus PVC, die durch Stützrohre (15) auf einen definierten Abstand gebracht und gegeneinander verspannt werden (9, 18). Zwischen den beiden Platten ist ein Glaskasten mit ebenfalls quadratischem Grundriss eingeklebt (14), der den Rührbehälter umgibt. Er dient einerseits der Temperierung des Stoffsystems und andererseits als Schaukasten für die Absetzversuche im Rührbehälter. Der Schaukasten besitzt zwei Schlauchanschlüsse (16), über die er mit dem Wasserkreislauf eines Thermostaten (Typ NB-D8/17, 2,07 kW, 220 V, Firma Lauda, Lauda-Königshofen) verbunden werden kann. Auf dem Schaukasten befindet sich zudem eine Skala, die ein Ablesen der Höhen von Sedimentations- und Koaleszenzkurven bei der Versuchsauswertung erlaubt. Eine dritte PVC-Platte (5) dient als Trägerplatte für das Rührwerk, das über eine Metallhalterung (3) mit der Trägerplatte verbunden ist. Die Trägerplatte kann auf Führungstangen (2) verschoben werden und ermöglicht so das Herausziehen der Rührerwellen aus dem Rührbehälter.

Eine konstruktive Änderung gegenüber der Rührzelle nach Henschke besteht darin, dass die Bodenplatte (18) nun eine Durchgangsbohrung aufweist. Der Rührbehälter selbst hat keinen geschlossenen Boden, sondern eine Öffnung mit Flanschstück. Durch die Bohrung in der Bodenplatte wird der Flansch des Rührbehälters geführt.

Auch der Wellenführdeckel, der auf dem Boden des Rührbehälters liegt, ist mit einer Durchgangsbohrung versehen, so dass die Dispersion ablaufen kann. In der Bodenplatte befindet sich eine Vertiefung, die zur Zentrierung des Rührbehälters dient. Die Abdichtung des Schaukastens nach unten erfolgt durch einen O-Ring (10) in der Vertiefung der Bodenplatte.

Kugelhahn

Als Verbindungselement zwischen Rührbehälter und Absetzbehälter wurde ein Kugelhahn (Typ 395.05, DN 25, PN 70, voller Durchgang, Edelstahl 1.4401 / 1.4408, Dichtungsmaterial Teflon, Firma Riegler, Bad Urach) verwendet. Er dient als Absperrvorrichtung während des Rührvorgangs. Ein wichtiges Kriterium bei der Konzeption der Anlage war die möglichst schnelle Dispersionsübertragung aus dem Rührbehälter in den Absetzbehälter. Ein Kugelhahn erfüllt diese Funktion sehr gut, da er schlagartig auf den vollen Querschnitt geöffnet werden kann. Der Hahn ist beidseitig an Rühr- und Absetzbehälter angeflanscht. Da beim ruckartigen Öffnen und Schließen des Hahns große Kräfte wirken, ist zusätzlich eine sichere Fixierung der Absperrarmatur im Trägergestell der Anlage notwendig. Hierzu ist der Hahn auf ein Winkelprofil aufgeschraubt, das mit der Trägerkonstruktion des Versuchstandes verschraubt ist.

Absetzbehälter (Settler)

Um möglichst identische Versuchsbedingungen für die Absetzversuche in Rührbehälter und Absetzbehälter zu gewährleisten, ist der Absetzbehälter dem Rührbehälter weitestgehend nachempfunden (siehe Abb. 3-6). Er besteht ebenfalls aus einem Glaszylinder mit einem Innendurchmesser von 80 mm (DN 80) und einer Höhe von 300 mm. Seitlich ist eine Falleitung mit einem Innendurchmesser von 20 mm (DN 20) angebracht. Die Falleitung ist durch eine Flanschverbindung mit dem Kugelhahn verbunden. Der Zufluss der Dispersion erfolgt im unteren Bereich des Absetzbehälters, um einen gleichmäßigen Einlauf zu gewährleisten. So wird das Tropfenspektrum nicht verändert und ein Einbringen von Luft in die Dispersion vermieden.

Der Absetzbehälter ist zwischen zwei PVC-Platten fixiert, die mit vier Gewindestangen (4) verbunden sind. Die obere Platte (1) ist in die Trägerkonstruktion der Ver-

suchsanlage eingehängt und mit dieser verschraubt. Sie ist mit zwei Bohrungen versehen, durch die der Glaszylinder (3) und die Falleitung (2) geführt werden. Die untere Platte (5) dient als Auflager für den Absetzbehälter. Sie ist ebenfalls mit einer Bohrung versehen, durch die der Ablasshahn (6) geführt wird.

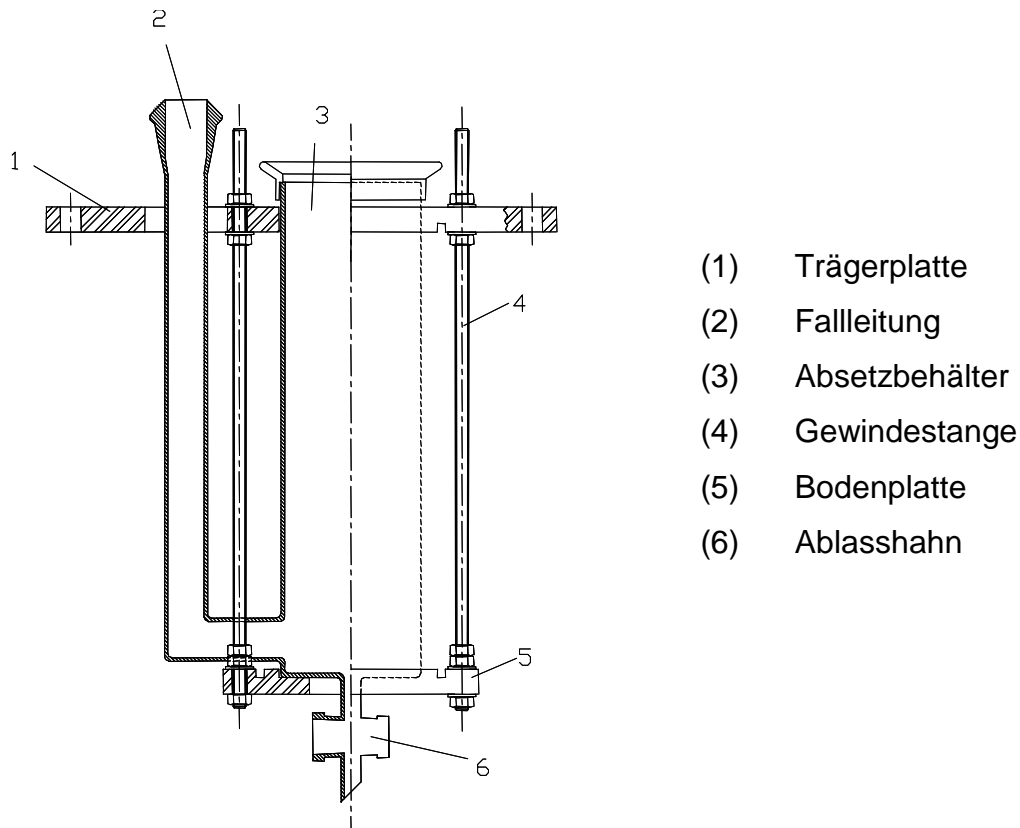


Abb. 3-6: Absetzbehälter (Settler)

3.3.2 Versuchsdurchführung

Bei Absetzversuchen in Schüttelflaschen oder der Rührzelle nach Henschke war es bisher nur bedingt möglich, Einbauten in den Versuch einzubringen und so den Einfluss der Einbauten auf die Dispersionstrennung zu untersuchen. Im neuen Versuchsaufbau können nun Absetzversuche mit beliebigen Einbauten durchgeführt werden. Ein Absetzversuch mit Einbauten gliedert sich dabei in zwei zusammengehörige Absetzversuche, der erste ohne Einbauten in der Rührzelle (Mixer) und der zweite mit Einbauten im Absetzbehälter (Settler). Die folgende Beschreibung der Versuchsdurchführung für Absetzversuche in der Rührzelle gilt sinngemäß sowohl für Versuche in der Rührzelle nach Henschke als auch für Versuche in der Rührzelle des

neuen Absetzversuchs. Für den neuen Absetzversuch schließt sich dann noch die Durchführung der Absetzversuche im Absetzbehälter an.

Absetzversuch in der Rührzelle (Mixer)

Der Absetzversuch in der Rührzelle dient als Grundlage zur Auslegung von Abscheider ohne Einbauten. Um einen aussagekräftigen Zusammenhang zwischen diskontinuierlicher und kontinuierlicher Dispersionstrennung herstellen zu können, wurde der Absetzversuch, wenn möglich, mit einer Probe des Stoffsystems aus der kontinuierlich betriebenen Abscheideranlage durchgeführt. So konnte sichergestellt werden, dass etwaige Spurenverunreinigungen aus der Anlage, die erhebliche Auswirkungen auf das Trennverhalten haben, auch beim Absetzversuch vorhanden waren.

Das Stoffsystem wird im gewünschten Phasenverhältnis in den Rührbehälter eingefüllt und zunächst temperiert. Das Phasenverhältnis wird dabei mit α bezeichnet:

$$\alpha = \frac{\text{Volumen wässrige Phase}}{\text{Gesamtvolumen}} \quad (3-1)$$

Während der Temperierung wird das Stoffsystem mit Hilfe des Rührwerks regelmäßig kurz durchmischt, um eine gleichmäßige Temperierung und Equilibrierung des Stoffsystems zu erreichen. Das temperierte Stoffsystem wird dann mit dem Rührwerk für eine bestimmte Zeitdauer bei der eingestellten Drehzahl, in allen hier durchgeführten Versuchen für $t = 30$ s bei $n = 800$ m^{-1} , dispergiert. Absetzversuch und Zeitmessung beginnen mit dem Abschalten des Rührwerks. Der anschließende Absetzvorgang wird mit Hilfe einer Videokamera aufgenommen. Die Rührorgane verbleiben für die Versuchsdauer im Rührbehälter. Versuche haben gezeigt, dass die in der Flüssigkeit eingetauchten Rührer keine merklichen Auswirkungen auf den Absetzvorgang haben, so dass der Behälter als frei von Einbauten betrachtet werden kann (Borgmann, 1995). Als Messwert wird beim Versuch direkt die Absetzzeit nach dem Kriterium aus 3.1 aufgenommen. Die Aufnahme weiterer Messwerte erfolgt durch spätere Auswertung der Videoaufnahme des Absetzversuchs an einem Bildschirm. Der aufgenommene Absetzversuch wird dazu in diskrete Zeitschritte eingeteilt, z. B. in Zeitintervalle von 5 s. Zu jedem Zeitschritt erfolgt nun die Aufnahme der zugehörigen Höhen der Sedimentations- und Koaleszenzkurven.

Absetzversuch im Absetzbehälter (Settler)

Nach Beendigung des ersten Absetzversuchs verbleibt das Stoffsystem zunächst im Mixer. In einem zweiten Versuch wird nun das identische Stoffsystem erneut dispergiert. Nach Erzeugung der Dispersion wird der Kugelhahn geöffnet, so dass die Dispersion durch das Fallrohr in den Settler abfließen kann, in den die jeweiligen Einbauten eingesetzt wurden. Der Absetzversuch im Settler beginnt, sobald die gesamte Dispersion aus dem Mixer in den Settler übertragen wurde. Die Absetzzeit und damit das Ende des Absetzversuchs wird anhand des Kriteriums aus 3.1 bestimmt. Bei besonders dichtgepackten und wenig transparenten Einbauten sind die letzten Tropfen an der Grenzfläche nur schwer zu beobachten, so dass bei diesen Absetzversuchen die Messgenauigkeit etwas geringer als bei Absetzversuchen ohne Einbauten ist. Nach Beendigung des Absetzversuchs wird der Settler durch Öffnen des Ablasshahns in ein Auffanggefäß entleert.

Anordnung der Videokamera und der Beleuchtung

Um eine möglichst genaue Auswertung der Videoaufnahmen der Absetzversuche zu ermöglichen, ist eine geeignete Anordnung der Kamera und der Lichtquellen an der Versuchsanlage wichtig. Dabei müssen die optischen Verzerrungen bei der Aufnahme so gering wie möglich gehalten werden. Im Idealfall sind die Phasengrenzfläche und die Sedimentationsfront am Bildschirm als horizontale Linien und nicht als Flächen zu erkennen. Das Stativ der Videokamera sollte dazu so eingestellt werden, dass sich das Objektiv auf gleicher Höhe wie der halbe Füllstand des aufzunehmenden Behälters befindet. Weiterhin sollte die Kamera nicht zu dicht am Versuchsstand positioniert werden. Als gut geeignet hat sich ein Abstand zwischen Kamera und Versuchsstand von 1,50 bis 2 m herausgestellt. Der aufzunehmende Behälter wird von hinten mittels einer Videolampe beleuchtet. Hinter dem Rühr- bzw. Absetzbehälter sind Diffusorschirme (z. B. aus Transparentpapier) angeordnet, um Reflexionen an den Glasoberflächen zu vermeiden. Es besteht außerdem die Möglichkeit, die Stoppuhr mit aufzunehmen. Dadurch wird die spätere Auswertung der Filme am Bildschirm erleichtert, da jedem Bild des Videofilms eindeutig der zugehörige Zeitpunkt im Absetzversuch zugeordnet werden kann. Die Stoppuhr wird in die dafür vorgesehene Halterung im Versuchsstand gestellt und schräg von vorne mit einer separaten Videolampe so beleuchtet, dass die Digitalanzeige der Uhr im Kamerasucher zu er-

kennen ist, aber keine Reflexionen an der Behälteroberfläche auftreten. Die Anordnung der Kamera und der Videolampen kann Abb. 3-7 entnommen werden. In Abb. 3-8 ist beispielhaft ein Bild aus einem typischen Videofilm gezeigt, bei dem man sowohl den Settler als auch die Stoppuhr erkennt. Die Stoppuhr wird jeweils sofort nach der Überführung der Dispersion in den Settler gestartet. Zu erkennen ist hier bereits, dass die Koaleszenz in dem Settler deutlich weiter fortgeschritten ist als in dem Rohr, in dem die Dispersion überführt wurde und das oberhalb der Stoppuhr noch zu erkennen ist.

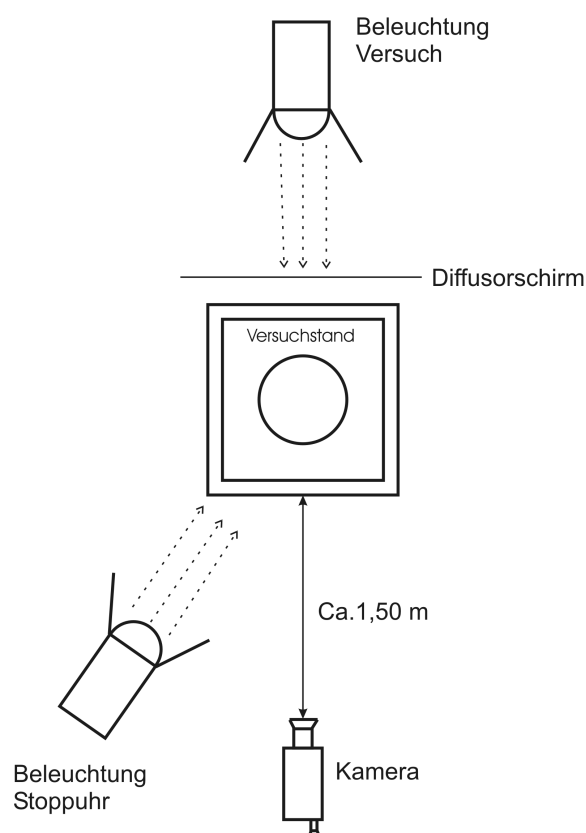


Abb. 3-7: Anordnung der Kamera und der Beleuchtung des Absetzversuchs (Freitag, 2003)



Abb. 3-8: Beispiel eines Absetzversuches mit Pall-Ringen aus PP

3.3.3 Validierung des Absetzversuchs mit Einbauten

Bei Inbetriebnahme des neuen Absetzversuchs wurde zunächst anhand von Vorversuchen validiert, dass der Versuchsaufbau generell funktionsfähig ist und dass die in 3.3 definierten Anforderungen erfüllt werden.

Bei geschlossenem Hahn und befülltem Rührbehälter befindet sich unterhalb des Wellenführdeckels, im Flansch des Behälters und im Kugelhahn Flüssigkeit, die nicht direkt gerührt werden kann. Der Abstand von der Kugel im Inneren des Hahns bis zum Glasboden des Rührbehälters beträgt etwa 120 mm. Das freie Volumen in diesem Teilstück wurde durch eine volumetrische Messung zu etwa 100 ml bestimmt. Um eine homogene Dispersion zu erzeugen, ist es unabdingbar, dass die Flüssigkeit in diesem Bereich mitvermischt wird. In einem Versuch wurde daher anstelle des Kugelhahns ein Endstück aus Glas mit gleichem Volumen an den Rührbehälter angeflanscht. Bei einem anschließend durchgeführten Rührvorgang konnte beobachtet werden, dass das durch das Rühren erzeugte Turbulenzgebiet bis in das Endstück hineinreicht und dass eine vollständige Vermischung des gesamten Flüssigkeitsinhalts stattfindet. Ein Totvolumen ist also durch Installation des Kugelhahns nicht entstanden (Freitag, 2003).

Bei den Vorversuchen zeigte sich zudem, dass die Übertragung der Dispersion vom Rührbehälter in den Absetzbehälter sehr schnell abläuft. Nach Öffnen des Kugelhahns vergehen etwa 1 bis 1,5 s, bis die Dispersion vollständig übertragen ist. Eine

merkliche Koaleszenz während der Übertragung kann daher also ausgeschlossen werden.

Bei der Durchführung von Absetzversuchen im Settler ohne Einsatz von Einbauten wurde aber festgestellt, dass durch die Übertragung der Dispersion zunächst ein deutlich sichtbarer Wirbel im Settler gebildet wird. Am deutlichsten war dies bei Phasenverhältnissen mit hohem Anteil an wässriger Phase zu beobachten. Hier befand sich die Flüssigkeit erst nach etwa 5 bis 10 s in Ruhe. Das Beispiel eines Vorversuchs in Abb. 3-9 zeigt, dass das Vorhandensein eines Wirbels die Sedimentation der Tropfen behindert.

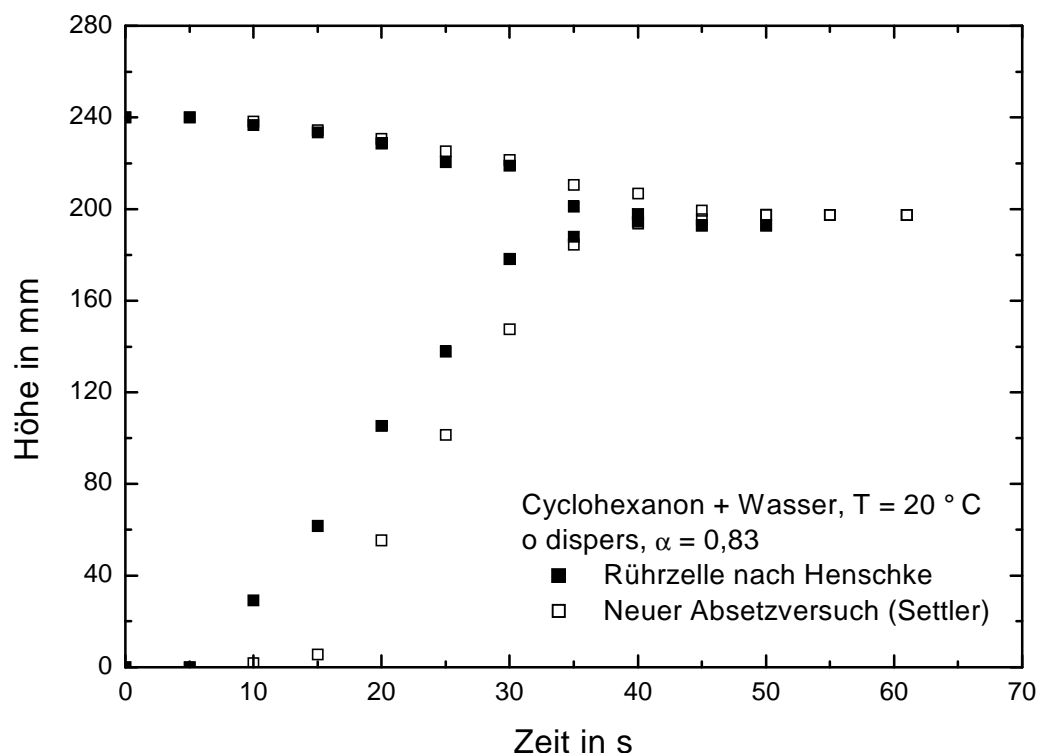


Abb. 3-9: Behinderung der Sedimentation durch Wirbelbildung beim Absetzversuch ohne Einbauten im Settler

Es ist eine deutliche Verschiebung der Sedimentationskurven zu erkennen, während die Koaleszenzkurven nahezu deckungsgleich verlaufen. Die Totzeit der Sedimentationskurve, also die Zeit, in der bis zum Abbau der anfänglichen Turbulenzen keine Sedimentation stattfindet, ist im Settler etwa 10 s größer als in der Rührzelle nach Henschke. Im weiteren Verlauf weisen beide Kurven dann eine nahezu gleiche Steigung auf, was auf gleiche Sedimentationsgeschwindigkeiten und damit gleiche Tropfen-

fengrößen schließen lässt. Die Sedimentation der Tropfen erfolgt im Settler also lediglich zeitverzögert. Es kann daraus geschlossen werden, dass die Ursache für die verlängerte Absetzzeit die Bildung eines Wirbels bei der Dispersionsübertragung ist, der die Sedimentation der Tropfen behindert, und dass das Tropfenspektrum der Dispersion durch die Übertragung nicht verändert wird.

Die Bildung eines Wirbels beim Settler ohne Einbauten entsteht durch die fertigungsbedingt nicht exakt zentrische Positionierung des Fallrohrs an der Wand des Glaszylinders. Die Rotationssymmetrie des Glaszylinders begünstigt eine Wirbelbildung zusätzlich. Beim Einsatz von Platteneinbauten oder Füllkörperschüttungen war, aufgrund der strombrechenden Wirkung der Einbauten, keine Wirbelbildung zu beobachten. Um die Wirbelbildung im Settler ohne Einbauten zu unterbinden, wurde deshalb ein Strombrecher aus Glas konstruiert, der in Abb. 3-10 abgebildet ist. Der Strombrecher besteht aus einer Glasplatte mit den Abmessungen 25 mm x 345 mm x 3 mm. Die Glasplatte ist auf einen Glasring aufgeschweißt, dessen Außendurchmesser 76 mm beträgt. Der Strombrecher wird so in den leeren Settler gestellt, dass sich die Glasplatte auf der gegenüberliegenden Seite des Einlaufs befindet. Sie unterbindet wirkungsvoll ein Rotieren der Flüssigkeit im Settler. Die Glasoberfläche des Strombrechers wird durch die Flüssigkeit praktisch nicht benetzt. Es können also keine Tropfen haften bleiben, so dass der Absetzvorgang nicht beeinflusst wird.

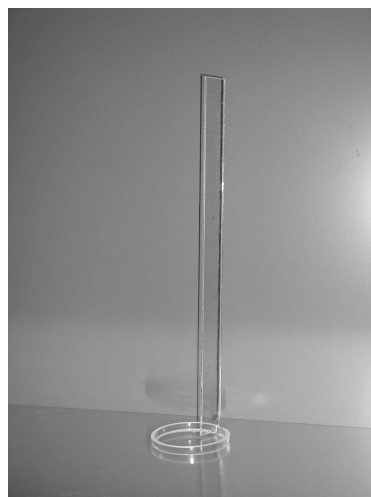


Abb. 3-10: Strombrecher für den Absetzversuch mit Einbauten

Unter Verwendung des Strombrechers wurden nun vergleichende Absetzversuche im Mixer und im Settler sowie in der Rührzelle nach Henschke unter vergleichbaren Be-

dingungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Validierungsmessungen mit dem System Cyclohexanon + Wasser sind in Abb. 3-11 zu sehen. Da die Füllhöhen in den verschiedenen Absetzversuche leicht variierten, wurden zur besseren Vergleichbarkeit alle Messwerte auf die jeweilige Füllhöhe h_{ges} normiert.

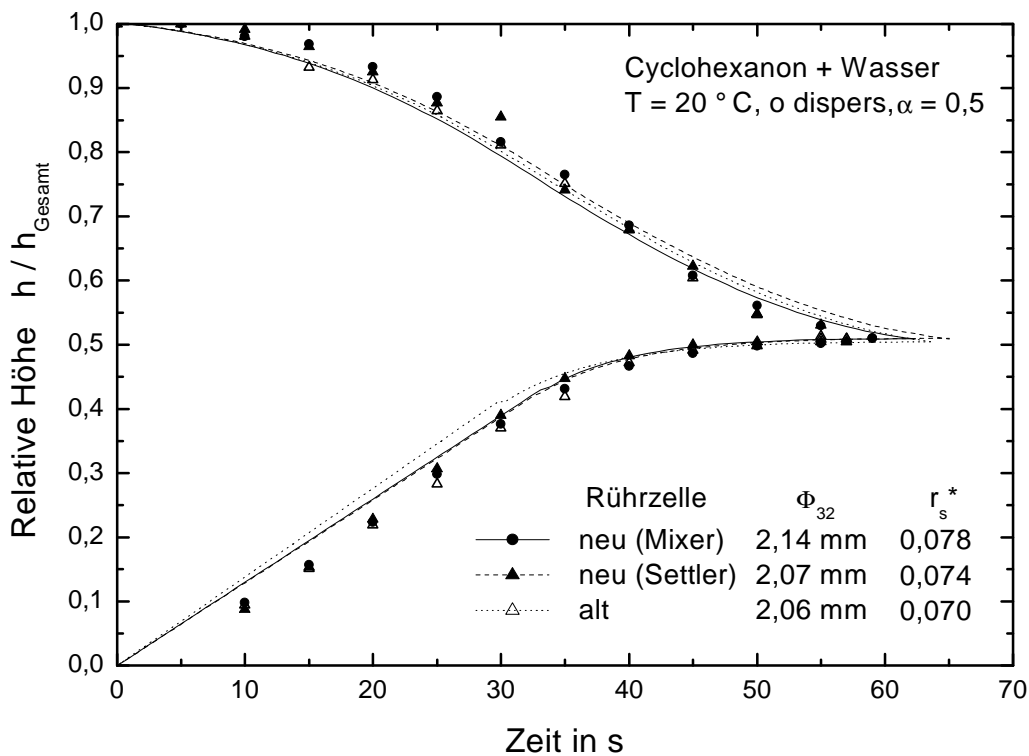


Abb. 3-11: Absetzversuche zur Validierung des neuen Absetzversuchs mit Einbauten (Freitag, 2003)

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Absetzversuche in der alten Rührzelle sowie dem Mixer und dem Settler des neuen Absetzversuchs nahezu identisch verlaufen. Die aus den Absetzkurven berechneten Anfangssauterdurchmesser sind im Rahmen der Messgenauigkeit gleich. Die Übertragung der Dispersion vom Mixer in den Settler verändert also das Tropfenspektrum nicht. Da zudem die Koaleszenzkurven deckungsgleich verlaufen, sind nur sehr geringe Abweichungen bei den ermittelten Asymmetrieparametern festzustellen. Die Absetzversuche in Mixer und Settler des neuen Absetzversuchs sowie die in der alten Rührzelle sind also sehr gut vergleichbar. Die in 3.3 gestellten Anforderungen werden mit dem neuen Absetzversuch mit Einbauten also gut erfüllt.

3.3.4 Durchgeführte Versuche

Die Absetzversuche in der Rührzelle ohne Einbauten dienen zur Charakterisierung der Koaleszenzeigenschaften der eingesetzten Stoffsysteme. Die eingesetzten Einbauten sind in Abschnitt 3.5 und die verwendeten Stoffsysteme im Detail mit ihren Eigenschaften in Abschnitt 3.6 vorgestellt. Hier soll nun das prinzipielle Vorgehen bei der Auswertung der Absetzversuche vorgestellt und anhand ausgewählter Beispiele verdeutlicht werden. Die Auswertung der Ergebnisse der Absetzversuche, in diesem Fall die Koaleszenz- und Sedimentationskurven, erfolgt unter Zuhilfenahme des Auslegungsmodells nach Henschke (1995). In einem ersten Schritt kann damit aus den Messwerten der Sedimentationskurve der Anfangssauterdurchmesser der erzeugten Dispersion näherungsweise berechnet werden. In einem zweiten Schritt wird dann der einzige Parameter des Modells, der Asymmetrieparameter r_S^* , durch Anpassung an die Messwerte der Koaleszenzkurve bestimmt. Mit dem Asymmetrieparameter, der die Koaleszenzeigenschaften eines Stoffsystems charakterisiert, kann nun ein Abscheider ohne Einbauten ausgelegt werden. Der Asymmetrieparameter ist nur vom Stoffsystem und der Dispersionsrichtung abhängig, nicht jedoch vom Versuchsaufbau (Geometrie der Rührzelle) und der Versuchsdurchführung (Phasenverhältnis, Rührerdrehzahl).

Abb. 3-12 zeigt die gemessenen und berechneten Koaleszenz- und Sedimentationskurven des Systems n-Butanol + Wasser + NaCl. Bei allen Versuchen erreicht die Sedimentationskurve die Höhe des späteren Trennspiegels deutlich vor dem Ende des jeweiligen Absetzversuchs und verläuft dann nahezu horizontal. Die Koaleszenz schreitet also noch weiter fort, während die Sedimentation bereits abgeschlossen ist, und ist damit der bestimmende Effekt bezüglich der Absetzzeit. Dieses Verhalten ist bei einer dispersen wässrigen Phase deutlich ausgeprägter. Während die Absetzkurven für disperse organische Phase den nahezu gleichen Verlauf und die gleiche Absetzzeit wie beim System n-Butanol + Wasser ohne Salzzusatz zeigen (Schlieper, 2001), hat sich die Absetzzeit für disperse wässrige Phase um den Faktor 2-3 erhöht. Dies ist einerseits auf eine etwas geringere Steigung der Sedimentationskurve und damit einen etwas geringeren mittleren Anfangstropfendurchmesser als auch auf eine durch den Salzzusatz merklich verzögerte Koaleszenz zurückzuführen.

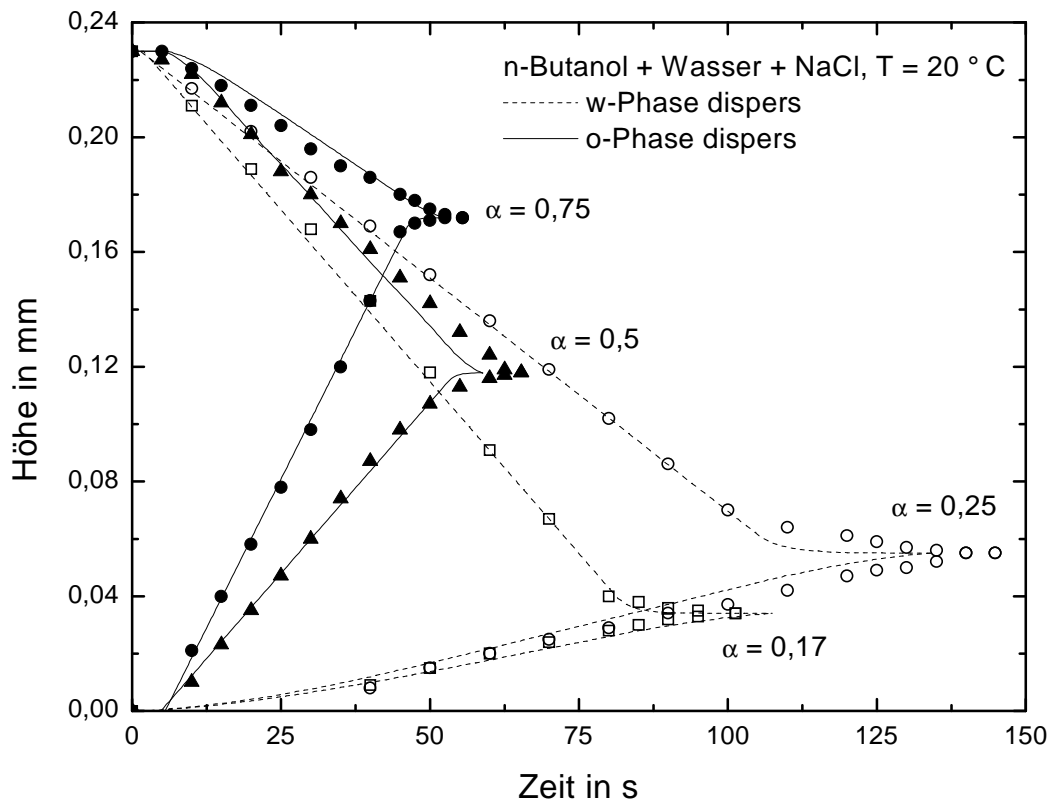


Abb. 3-12: Absetzversuche in der Rührzelle mit dem System n-Butanol + Wasser + NaCl

Die Absetzkurven, die mit den durch das Modell nach Henschke bestimmten und für eine Dispersionsrichtung gemittelten Asymmetrieparametern berechnet wurden, zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Absetzkurven. Es zeigt sich, dass das durch die Salzzugabe merklich beeinflusste Koaleszenzverhalten bei disperser wässriger Phase vom Modell nach Henschke anhand des Asymmetrieparameters erfasst und korrekt wiedergegeben werden kann.

Tab. 3-2 führt die Asymmetrieparameter der verschiedenen Stoffsysteme auf, die aus den Absetzversuchen in der Rührzelle ohne Einbauten ermittelt wurden.

Nachdem die Charakterisierung der Stoffsysteme erfolgt und die Eignung des Absetzversuchs in der Rührzelle mit Einbauten anhand der Vorversuche validiert war, konnten Absetzversuche mit verschiedenen Stoffsystemen und Einbauten durchgeführt werden. Tab. 3-3 gibt eine Übersicht über die durchgeführten Versuchsreihen zur Untersuchung der Trennwirksamkeit der Einbauten.

Stoffsystem Wasser +	r_S^* für disperse w-Phase				r_S^* für disperse o-Phase			
	Eigene Messungen	Henschke, 1995	Chatterjee, 1998	Schlieper, 2001	Eigene Messungen	Henschke, 1995	Chatterjee, 1998	Schlieper, 2001
Cyclohexanon	0,219	0,215	0,17	-	0,094	0,08	0,09	-
n-Butanol	0,381	0,198	-	0,2	0,099	0,083	-	0,063
Toluol	-	-	-	-	0,018	0,025	-	-
n-Butanol + NaCl	0,105	-	-	-	0,157	-	-	-

Tab. 3-2: Asymmetrieparameter der verschiedenen Stoffsysteme

Die Trennwirksamkeit der Einbauten bei der diskontinuierlichen Dispersionstrennung wird anhand der bezogenen Absetzzeit bewertet. Die bezogene Absetzzeit $t_{E,bez}$ ist definiert als

$$t_{E,bez} = \frac{t_{E, \text{Absetzversuch mit Einbauten}}}{t_{E, \text{Absetzversuch ohne Einbauten}}}, \quad (3-2)$$

d.h. als Quotient aus Absetzzeit im Absetzversuch mit Einbauten (Versuch im Settler) und Absetzzeit im Absetzversuch ohne Einbauten (Versuch im Mixer). Abb. 3-13 zeigt beispielhaft Versuche mit dem System Cyclohexanon + Wasser und verschiedenen Einbauten.

Einbauten	Werkstoff	Abstand / Nenngröße	Stoffsystem Wasser +		
			Cyclo- hexanon	n-Butanol	n-Butanol + NaCl
Platten	Edelstahl	10 mm	x	x	x
		22 mm		x	x
		46 mm	x	x	x
	PP	10 mm	x	x	x
		22 mm		x	x
		46 mm	x	x	x
Pall-Ringe	Edelstahl	15 mm	x	x	x
		25 mm	x		
	PP	15 mm	x	x	x
Interpak	Edelstahl	15 mm	x		
		20 mm	x		
Raschig Super-Ring	Edelstahl	0,3	x		
		0,7	x		
Rombopak	Edelstahl	9M	x		
		12M	x		
Gestrickpackung	Edelstahl	0,7 mm		x	

Tab. 3-3: Versuchsreihen zur Untersuchung der Trennwirksamkeit von Einbauten

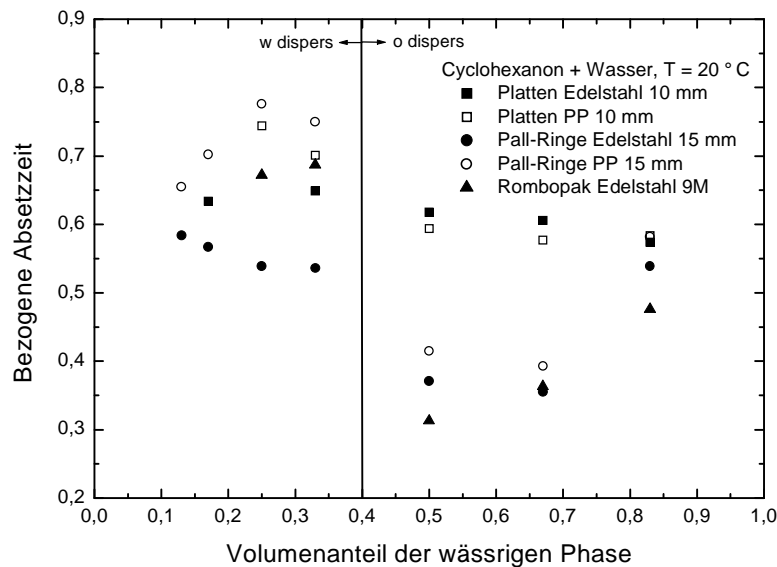


Abb. 3-13: Trennwirksamkeit verschiedener Einbauten bei der diskontinuierlichen Dispersionstrennung

Die Versuche zeigen, dass je nach Einbautentyp und -material eine Verkürzung der Absetzzeit um bis zu 70 %, mindestens aber um 20 % erreicht werden kann. Bei einer dispersen organischen Phase sind Füllkörper und strukturierte Packungen deutlich wirksamer als Platten. Beim Wechsel zu einer dispersen wässrigen Phase nimmt die Trennwirksamkeit bei allen Einbauten merklich ab. Dieses geänderte Verhalten bei Wechsel der Dispersionsrichtung ist bei Füllkörpern und strukturierten Packungen deutlicher ausgeprägt, während die Trennwirksamkeit der Platten nur geringfügig abnimmt. Bei Füllkörpern und strukturierten Packungen zeigt sich zudem eine deutliche Abhängigkeit der bezogenen Absetzzeit vom Einbautenmaterial. Dies kann auf eine geänderte Benetzung der unterschiedlichen Einbautenoberflächen durch die jeweils disperse Phase zurückgeführt werden.

Die hier ermittelte Trennwirksamkeit in Form der bezogenen Absetzzeit ist jedoch nur für die diskontinuierliche Dispersionstrennung aussagekräftig. Einflüsse auf die Dispersionstrennung, die durch die Durchströmung des Verteilerlochblechs und der Einbauten im kontinuierlich betriebenen Abscheider entstehen, können mit dem Absetzversuch mit Einbauten nicht erfasst werden.

Neben der Untersuchung der Trennwirksamkeit der verschiedenen Einbauten dienen die Absetzversuche mit Einbauten auch dem Zweck, den Vorgang der Dispersionstrennung im Einbautenbereich detaillierter untersuchen zu können. Anhand der ge-

wonnenen Erkenntnisse kann dann eine verbesserte und physikalisch fundierte Modellierung der Dispersionstrennung im Einbautenbereich erreicht werden (siehe 4.3). Den Schwerpunkt bilden dabei Absetzversuche mit Plattenpaketen und Füllkörpern.

Bei Plattenpaketen erfolgt die Auswertung analog zu Absetzversuchen ohne Einbauten aus den Videoaufnahmen des Versuchs am Bildschirm. Die Bestimmung der Koaleszenz- und Sedimentationskurven erfolgt dabei jeweils getrennt für die einzelnen Plattenzwischenräume, im folgenden auch Compartments genannt. Man erhält so für jedes Compartment eine Koaleszenz- und eine Sedimentationskurve, die zusammen betrachtet dann den gesamten Vorgang der Dispersionstrennung im Plattenpaket detaillierter erkennen lassen (siehe Abb. 3-14).

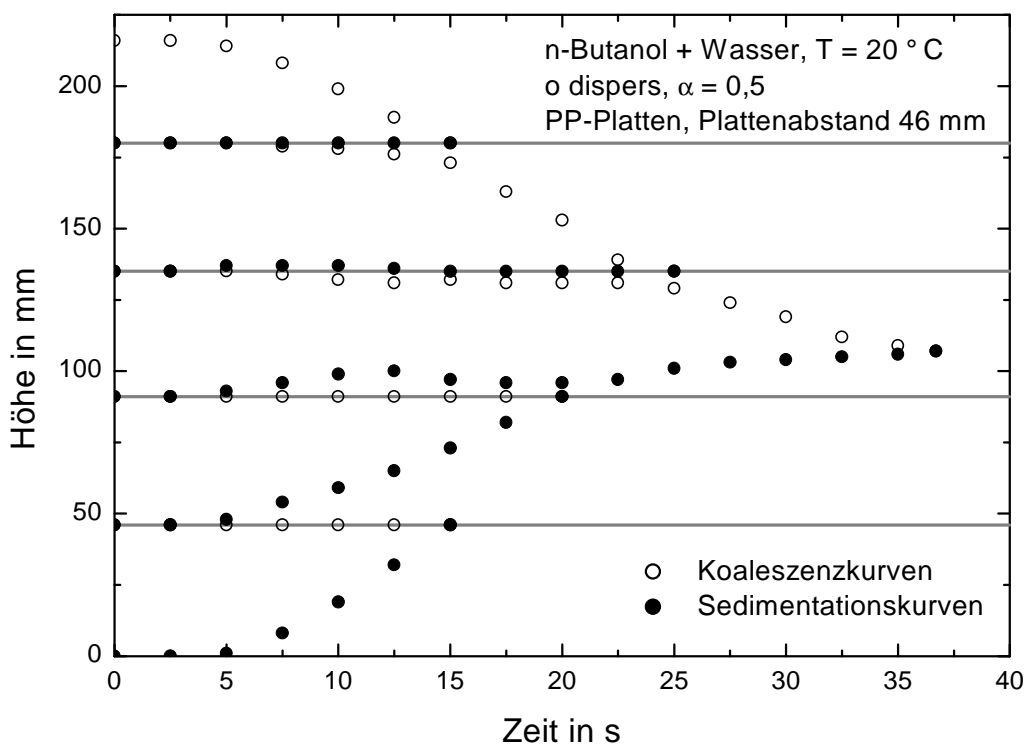


Abb. 3-14: Absetzversuch mit Platten

Absetzversuche mit Füllkörpern können ebenfalls detaillierter ausgewertet werden, wenn die jeweilige Füllkörperpackung transparent genug ist und so eine Beobachtung der Absetzkurven zulässt. Bei Verwendung von Packungen aus PP-Füllkörpern ist der Kontrast der dichtgepackten Schicht gegenüber den kohärenten Phasen bei rückseitiger Beleuchtung groß genug, um Koaleszenz- und Sedimentationskurve aus den Videoaufnahmen ermitteln zu können. Abb. 3-15 zeigt die Auswertung eines Ab-

Absetzversuch mit Füllkörpern, der mit dem dazugehörigen Absetzversuch ohne Einbauten verglichen wird. Koaleszenz- und Absetzkurve in der Füllkörperpackung haben zwar im Vergleich mit dem Versuch ohne Einbauten den gleichen charakteristischen Verlauf, lassen aber in beiden Bereichen deutlich die beschleunigende Wirkung der eingesetzten Füllkörper erkennen.

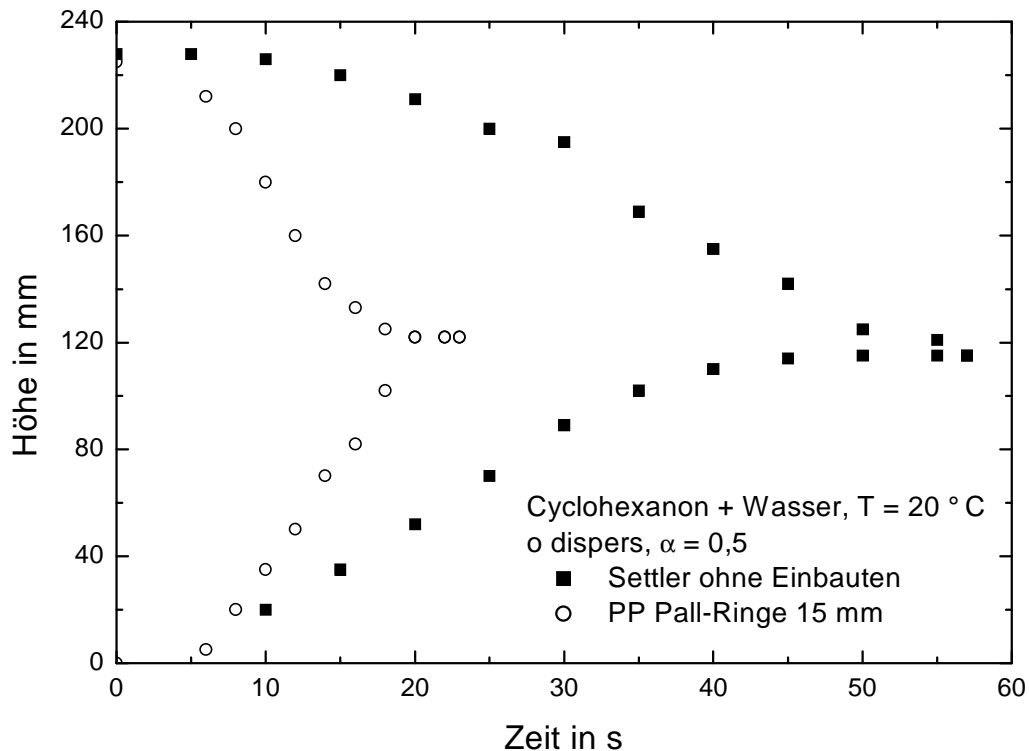


Abb. 3-15: Absetzversuch mit Füllkörpern

Um die Versuchsauswertung zu erleichtern und Effekte zu diskriminieren, die eine einzelne Platte eines Plattenpakets auf die Sedimentation und die Koaleszenz der Tropfen hat, wurden zusätzlich Absetzversuche mit Modelleinbauten durchgeführt. Die Modelleinbauten entsprechen dabei konstruktiv den Platteneinbauten für Absetzversuche (siehe 3.5), verfügen aber lediglich über eine einzelne Platte, die in beliebigen Höhenpositionen eingesetzt werden kann. Die Auswertung der Absetzversuche erfolgt hier ebenfalls getrennt für die einzelnen Compartments. Ein Beispiel für einen Absetzversuch mit einer einzelnen Edelstahl-Platte ist in Abb. 3-16 abgebildet.

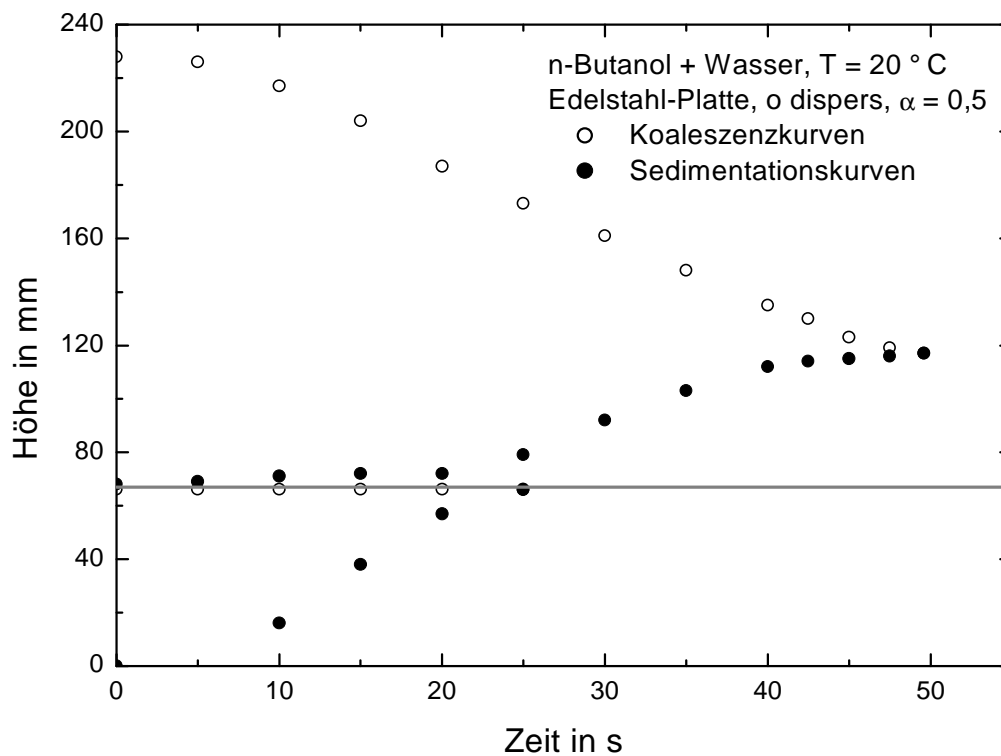


Abb. 3-16: Absetzversuch mit einem Modelleinbau

3.4 Abscheideranlage im Technikumsmaßstab

3.4.1 Versuchsaufbau

Ein wichtiger Bestandteil der experimentellen Arbeiten sind neben den vorgestellten Versuchen im Labormaßstab insbesondere die Versuche an liegenden Schwerkraftabscheidern mit und ohne Einbauten im Technikumsmaßstab. Im folgenden wird daher der Aufbau der Abscheideranlage beschrieben, die im Rahmen vorangegangener Arbeiten am Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik aufgebaut und betrieben wurde (Chatterjee, 1998, Schlieper, 2001). Das Fließbild der Anlage ist in Abb. 3-17 dargestellt.

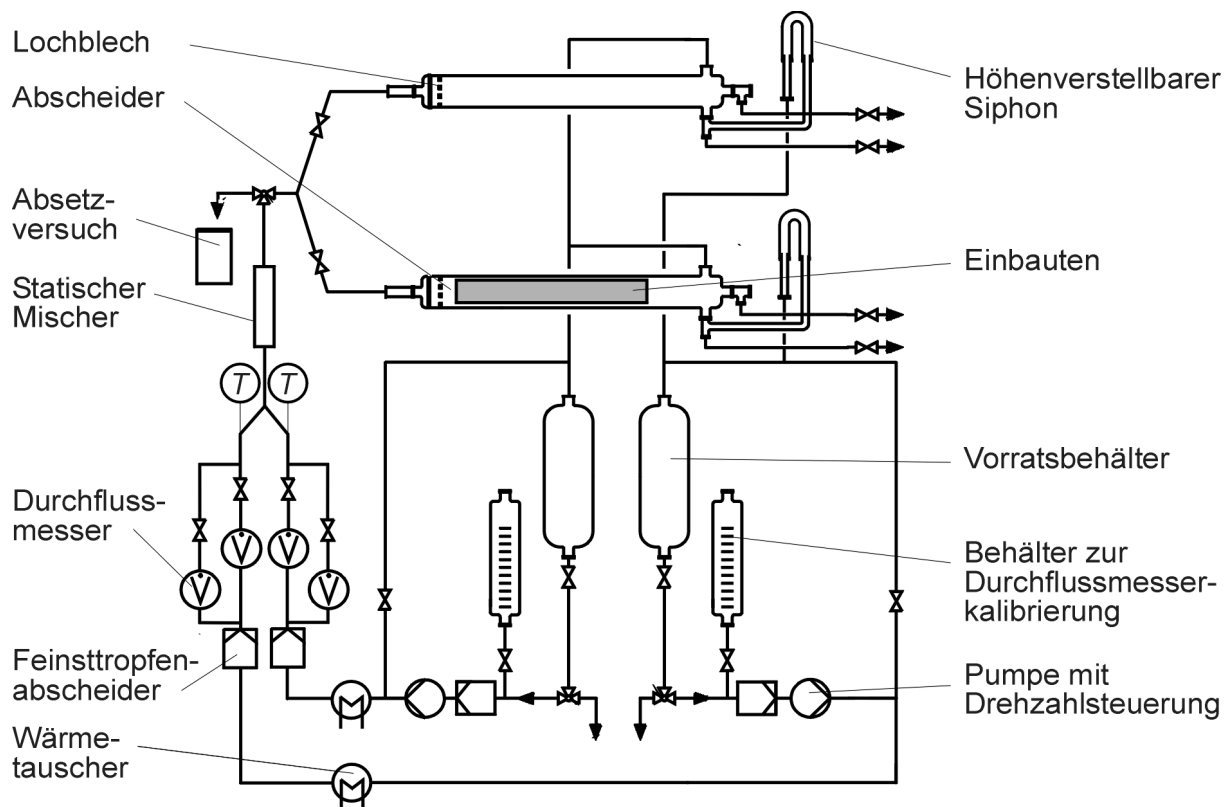


Abb. 3-17: Schematisches Fließbild der Abscheideranlage

Kernstück der Abscheideranlage sind die beiden parallel geschalteten, geometrisch gleichen Abscheider mit einem Nenndurchmesser von 200 mm (DN 200) und einer Gesamtlänge von 2000 mm. Die Verschaltung der Zulaufrohre der beiden Abscheider erlaubt zeitlich direkt aufeinanderfolgende vergleichende Versuche mit und ohne Einbauten ohne die zwischenzeitliche Durchführung von Umbaumaßnahmen. Das Risiko einer Veränderung oder Verunreinigung des Stoffsystems zwischen vergleichenden Messungen kann so minimiert werden. Um die chemische Beständigkeit der Anlage gegenüber den verwendeten Lösungsmitteln zu gewährleisten, bestehen die Anlagenkomponenten weitestgehend aus Borosilikatglas, Edelstahl und PTFE.

Als Vorlage für das Stoffsystem fungieren je Phase ein Kugelgefäß und ein Zylindergefäß von je 20 l Fassungsvermögen in Parallelschaltung. Eine Skalierung auf den Zylindergefäßen erlaubt eine Kalibrierung der Schwebekörperdurchflussmesser. Aus der Vorlage werden die Phasen mittels zweier Kreiselpumpen gefördert (Typ Gekoblok 25-100 RM-30-SIC-gek., 1,85 kW, 380 V, 50 Hz, 3000 min⁻¹, Eex II T3, Firma GEKO, Eltville a. Rh.), deren Drehzahl durch einen Frequenzumrichter (Typ ACP

6004-0, 4 kW, Firma Berges Electronic, Marienheide-Rodt) stufenlos zwischen 0,05 und maximal 5,0 m³/h einstellbar ist.

Die Phasen durchströmen dann zwei wassergekühlte Wärmetauscher (Typ NAK 6/25, Firma Schott Engineering, Mainz), in denen sie auf eine konstante Temperatur von 20 °C temperiert werden. Zur Temperierung des Kühlwassers wird ein Umlaufkühler verwendet (Typ WK 5000, 6 kW, 380 V, Firma Lauda, Lauda-Königshofen), der eine Regelgenauigkeit von 0,5 K und eine Temperaturkonstanz von weniger als ±1 K besitzt. Die Temperaturen beider Phasen werden permanent mit zwei Widerstandsthermometern (PT 100, Typ WID 25/150/D nach DIN 43750, Firma Schott Engineering, Mainz) und die Raumtemperatur mit einem digitalen Raumthermometer in Höhe des Abscheiders gemessen. Die ermittelten Temperaturen werden dann auf digitalen Displays in einer Messbox angezeigt.

Unmittelbar nach den Wärmetauschern durchströmen die Phasen jeweils ein mehrlagiges Faserbett (Edelstahlfasern, 4 Lagen mit Faserdurchmesser 4 µm und 4 Lagen mit Faserdurchmesser 22 µm), das zur Abscheidung von Feinstropfen dient. Der Einsatz der Faserbetten ist notwendig, da die Phasen in der Abscheideranlage im Kreislauf gefahren werden und sich aufgrund einer unvollständigen Koaleszenz mit ausgetragener Fremdphase in Form einer feinen Trübe anreichern. Die jeweilige Fremdphase sammelt sich in diesen Koaleszern zunächst soweit an, bis die entstehenden größeren Tropfen mit der strömenden Hauptphase mitgerissen werden. Da die Trübe nur deutlich unter 1 % an Fremdphase ausmacht, kann die so verursachte Verschiebung des Phasenverhältnisses im Rahmen der Messgenauigkeit vernachlässigt werden. Durch die Koaleszer wird so der Einfluss von feinen Tropfen auf die Koaleszenzphänomene wirkungsvoll verhindert und eine Beurteilung einer Trübeerzeugung durch die Einbauten möglich.

Die anschließende Volumenstrommessung erfolgt mit senkrecht angeordneten Schwebekörperdurchflussmessern (Rotametern). Es kann dabei je Phase zwischen zwei Rotametern mit den Nenndurchmessern DN 25 und DN 50 gewählt werden, um so große und kleine Volumenströme mit jeweils guter Auflösung ablesen zu können. Die Rotameter beider Phasen müssen für jedes Stoffsystem neu kalibriert werden.

Die beiden Phasen werden dann durch ein Hosenrohr zusammengeführt und dem statischen Mischer, einem Kenics-Wendelmischer (Typ KMS-KMR 25, 6 Mischerelemente, $L/D = 1,6$, Firma Chemineer Inc., Dayton OH, USA), zugeführt. Hinter dem statischen Mischer befindet sich eine Zapfstelle für Dispersionsproben, z. B. für einen Absetzversuch.

Die erzeugte Dispersion gelangt dann über ein Einlaufrohr DN 50 in den jeweiligen Abscheider und trifft dort auf ein Lochblech, das einen Impulsabbau und eine Dispersionsverteilung bewirkt. Dabei kommen zwei verschiedene Lochbleche zum Einsatz, im folgenden als Typ A und C bezeichnet. Bei einem Öffnungsverhältnis von $m = 0,15$ weist Typ A eine gleichmäßige Verteilung der Löcher auf, während Typ C im mittleren Bereich keine Löcher besitzt (siehe Anhang 7.6). Im Rahmen der Versuche werden Abscheider ohne und mit Einbauten jeweils unter Verwendung des gleichen Lochblechs betrieben.

Bei Versuchen mit Einbauten schließt sich hinter dem Lochblech der jeweilige Einbau an, der in den Glasschuss des Abscheiders eingebaut ist. Die nutzbare Abscheiderlänge lässt sich durch ein verschiebbares Wehr einstellen. Zum Betrachter hin ist am Glasschuss ein wassergefüllter Schaukasten mit planen Scheiben montiert, der die Beobachtung des Geschehens im Abscheider und die Aufnahme der Messwerte ohne optische Verzerrungen ermöglicht. Am Ende des Glasschusses befinden sich die Abzüge der beiden Phasen. Mittels eines verstellbaren U-Rohres wird der Phasenabzug der schweren Phase auf die Höhe des Abzuges der leichten Phase angehoben. Dies erlaubt die Einstellung der Lage der Phasengrenze nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren. Die getrennten Phasen fließen dann wieder in ihre jeweiligen Vorratsbehälter zurück und können im weiteren Versuchsablauf erneut genutzt werden.

3.4.2 Versuchsdurchführung

Vor dem eigentlichen Versuchsbeginn wird zunächst das gesamte in der Anlage befindliche Stoffsystem mit den Kreiselpumpen umgewälzt, um eine gleichmäßige Temperierung und Equilibrierung der Phasen sicherzustellen. Bei Erreichen der Versuchstemperatur $T = 20^\circ \text{C}$ werden zunächst Absetzversuche an der Zapfstelle der Abscheideranlage durchgeführt. Das Phasenverhältnis und die Volumenströme für

diese standardisierten Absetzversuche werden für ein Stoffsystem jeweils konstant gehalten. Durch die fortlaufende Durchführung der Absetzversuche kann wie bei den Absetzversuchen in der Schüttelflasche eine Kontrolle der Stoffsystemqualität im Abscheider über die ermittelte Absetzzeit erfolgen (siehe 3.2.2).

Die Durchführung des Absetzversuchs am Abscheider gleicht weitestgehend der des Absetzversuchs in der Rührzelle (siehe 3.3.2). Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass die Dispersion nicht in einer Rührzelle erzeugt, sondern an einer Zapfstelle aus der in Betrieb befindlichen kontinuierlich betriebenen Abscheideranlage entnommen wird. Nachdem die festgelegten Werte des Phasenverhältnisses und der Volumenströme der beiden Phasen eingestellt wurden, kann der Absetzversuch durchgeführt werden. Der Absetzbehälter wird dazu unter die Zapfstelle der Abscheideranlage gestellt und durch Öffnen des Hahns der Zapfstelle mit der im statischen Mischer erzeugten Dispersion gefüllt. Ist der gewünschte Füllstand im Absetzbehälter erreicht, wird der Hahn der Zapfstelle wieder geschlossen und die Zeitmessung des Absetzversuchs gestartet. Das weitere Vorgehen entspricht nun dem beim Absetzversuch im Rührkessel.

Der wesentliche Vorteil gegenüber dem Absetzversuch in der Rührzelle ist hierbei, dass die Versuchsfüssigkeiten direkt aus der Abscheideranlage entnommen werden und kein weiterer Transport oder Umfüllvorgang des Stoffsystems erforderlich ist. Eine eventuelle Änderung oder Verunreinigung des Stoffsystems wird dadurch verhindert oder zumindest verringert. Durch die Verwendung der originalen Dispersion aus der Dispersionserzeugung des Abscheiders kann zudem der Einfluss des Volumenstroms und des Phasenverhältnisses auf die Tropfengröße der im statischen Mischer erzeugten Dispersion erfasst werden.

Der wesentliche Nachteil des Absetzversuchs am Abscheider ist durch die Konstruktion der Abscheideranlage bedingt. Die beiden Phasen des Stoffsystems werden mit Kreiselpumpen gefördert, deren Widerstand auf der Druckseite während der Entnahme der Dispersion bei geöffnetem Hahn der Zapfstelle wesentlich geringer ist als bei der Förderung der Flüssigkeiten durch einen der Abscheider. Dadurch werden die geförderten Volumenströme der Pumpen während der Dispensionsentnahme schlagartig größer. Diese Änderung des Volumenstroms ist je nach Phasenverhältnis und den jeweiligen Stoffdaten der Phasen für die einzelnen Pumpen unterschiedlich groß,

so dass sich während der Dispersionsentnahme nicht nur der Gesamtvolumenstrom sondern auch das Phasenverhältnis ändert. Die Versuchsbedingungen im Abscheiderversuch und dem dazugehörigen Absetzversuch sind also nicht exakt dieselben.

Nach den Absetzversuchen können die eigentlichen Versuche an der Abscheideranlage durchgeführt werden. Hierzu werden die für den jeweiligen Versuch gewünschten Werte des Phasenverhältnisses und der Volumenströme eingestellt. Im Abscheider stellt sich nun langsam ein stationärer Betriebszustand des Abscheiders ein. Dazu muss der Trennspiegel zwischen den Phasen auf die gewünschte Lage, hier in der Regel die Abscheidermitte, eingestellt und gegebenenfalls nachgeführt werden, da Änderungen der Trennspiegellage den Betriebszustand des Abscheider erheblich beeinflussen können. Ist der stationäre Betriebszustand erreicht (in der Regel nach etwa 15 Minuten), können die Messwerte des jeweiligen Versuchs aufgenommen werden. Zunächst werden die Stauhöhen vor und die Keilhöhen nach dem Lochblech ermittelt. Danach wird die Länge des sich hinter dem Lochblech ausbildenden Dispersionskeils vermessen. Der Fremdphasenaustrag am Austritt des Abscheiders wird anhand der Trübe der Phasen qualitativ beurteilt. Die Temperaturen der Phasen und die Raumtemperatur werden in einer Messbox von den jeweiligen digitalen Displays abgelesen. Abschließend wird ein weiterer Absetzversuch bei den jeweiligen Versuchsbedingungen durchgeführt. Danach können die Einstellungen für den nächsten Versuch vorgenommen werden.

Aufnahme der Messwerte

Im folgenden werden die Messwerte diskutiert, die während der Versuche an der Abscheideranlage aufgenommen werden. Als Bezugspunkt für Längen in horizontaler Richtung (Wandablösung, Keilende) wird dabei das Verteilerlochblech und für Längen in vertikaler Richtung (Stauhöhe vor dem Lochblech, Keilhöhe nach dem Lochblech und Trennspiegellage) die Abscheidermitte definiert.

Die Aufnahme der Messwerte sollte stets bei Trennspiegellage 0, d.h. in der Abscheidermitte, erfolgen. Die Trennspiegellage wird am Ende des Abscheiders zwischen den Phasenabzügen gemessen (siehe Abb. 3-18). Trennspiegellage 0 bedeutet dabei nicht, dass der Abscheider zu je 50 % mit den beiden Phasen befüllt ist,

sondern nur, dass sich die Grenzfläche am Ende des Abscheiders auf halber Höhe befindet.

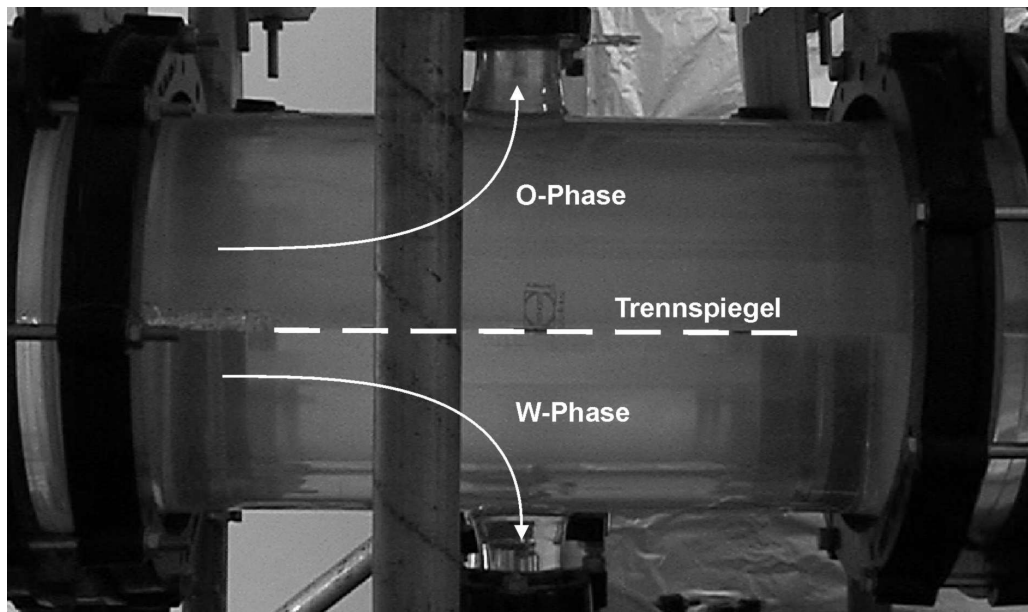


Abb. 3-18: Lage des Trennspiegels

Die Stauhöhen vor dem Lochblech geben an, wie mächtig sich die dichtgepackte Tropfenschicht vor dem Lochblech am Eintritt in den Abscheider aufstaut (siehe Abb. 3-19). Als Messwerte werden die obere und die untere Grenze der Tropfenschicht aufgenommen.

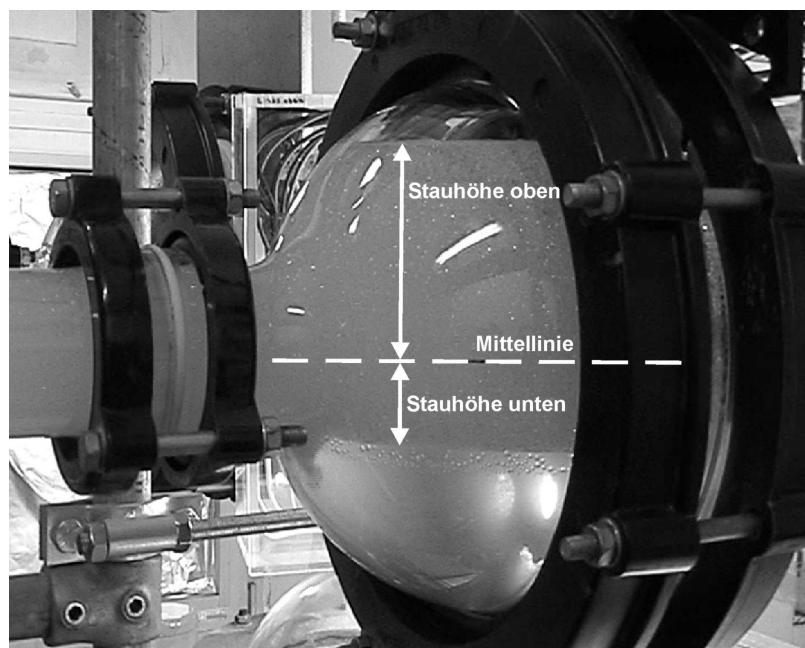


Abb. 3-19: Stauhöhen vor dem Lochblech

Die Keilhöhen nach dem Lochblech beschreiben die Mächtigkeit der dichtgepackten Tropfenschicht nach dem Durchtritt durch das Verteilerlochblech in den Abscheider (siehe Abb. 3-20). Als Messwerte werden dabei die obere und die untere Grenze der Tropfenschicht aufgenommen. Über die weitere Lauflänge im Abscheider bildet sich nun der Dispersionskeil aus und wird in die kohärenten Phasen aufgetrennt. Dabei wird im Idealfall von einer dreieckigen Keilform ausgegangen, so dass die Keilgeometrie durch die Keilhöhen nach dem Lochblech und das Keilende festgelegt ist. Weicht die tatsächliche Keilform deutlich von der dreieckigen Idealform ab, müssen die Keilhöhen zusätzlich an weiteren Punkten über der Lauflänge des Abscheiders aufgenommen werden.

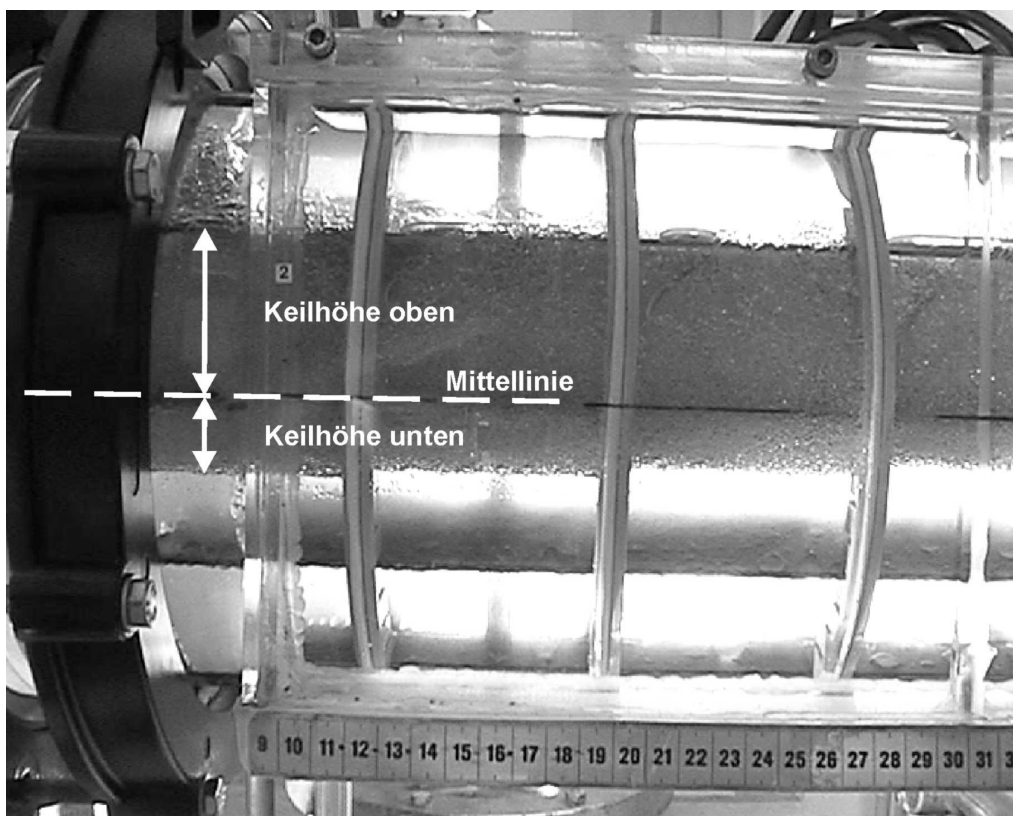


Abb. 3-20: Messgröße Keilhöhen nach dem Lochblech

Die zweite zur Beschreibung der Dispersionskeilgeometrie benötigte Messgröße ist das Ende des Dispersionskeils, an dem die beiden Phasen wieder getrennt voneinander vorliegen. Für das Erreichen des Dispersionskeilendes wurden verschiedene Kriterien definiert, bei denen zwischen Abscheider ohne und mit Einbauten unterscheiden wird.

Beim Abscheider ohne Einbauten ist die Wandablösung die Länge, bei der die Trennung an der Abscheiderwand beendet ist. Dort löst sich der Dispersionskeil von der Abscheiderwand ab und bildet eine frei schwimmende Zunge aus. Das Ende der frei schwimmenden Dispersionszunge wird als Keilende aufgenommen. Da sich der Dispersionskeil von Einbauten unbeeinflusst ausbreiten kann, kann der Ende des Trennvorgangs sehr gut durch den Mittelwert der Größen Wandablösung und Keilende, im folgenden als mittlere Trennlänge bezeichnet, charakterisiert werden. Abb. 3-21 zeigt schematisch einen Abscheider ohne Einbauten in der Aufsicht mit den wesentlichen Messgrößen Wandablösung und Keilende.

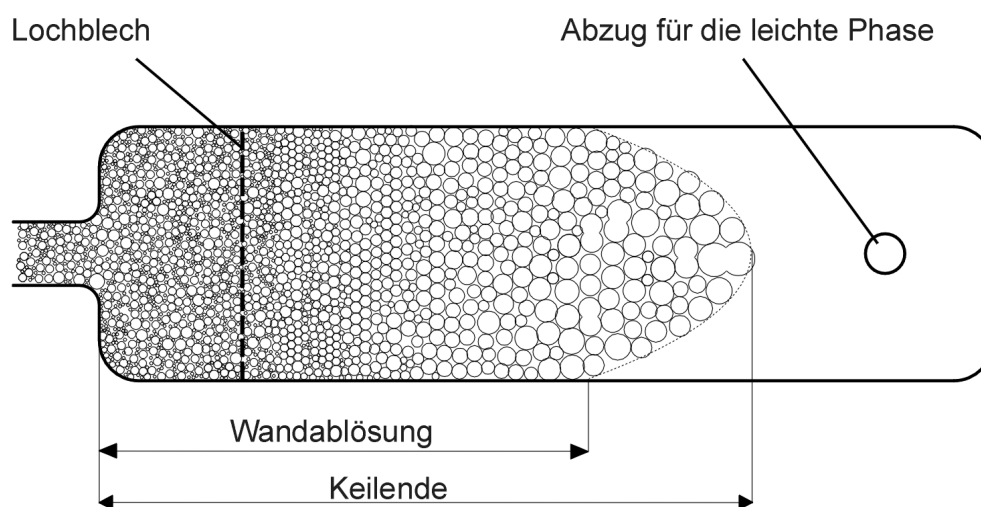


Abb. 3-21: Abscheider ohne Einbauten in Aufsicht mit wesentlichen Messgrößen

Die Wandablösung im Abscheider mit Einbauten entspricht der im Abscheider ohne Einbauten. Das Keilende kann bei Platteneinbauten durch Neigung des Blickwinkels entsprechend des Neigungswinkels der Platten in der Abscheidermitte beobachtet werden. Dabei wird hier mit Keilende das Ende der interessierenden Koaleszenzvorgänge bezeichnet, da stets einzelne Tropfen oder Tropfencluster länger an der Phasengrenze verweilen und aus dem Plattenpaket ausgetragen werden können. Dabei beeinflusst die Platte unmittelbar an der Phasengrenze die Bewegung der letzten Tropfen sehr stark, so dass das Ende des Trennvorgangs im Abscheider mit Einbauten anhand der Wandablösung charakterisiert wird. Dies erweist sich als besonders günstig, da bei Füllkörperpackungen aufgrund der dichten und undurchsichtigen Schüttung das Keilende in der Abscheidermitte nicht beobachtet werden kann.

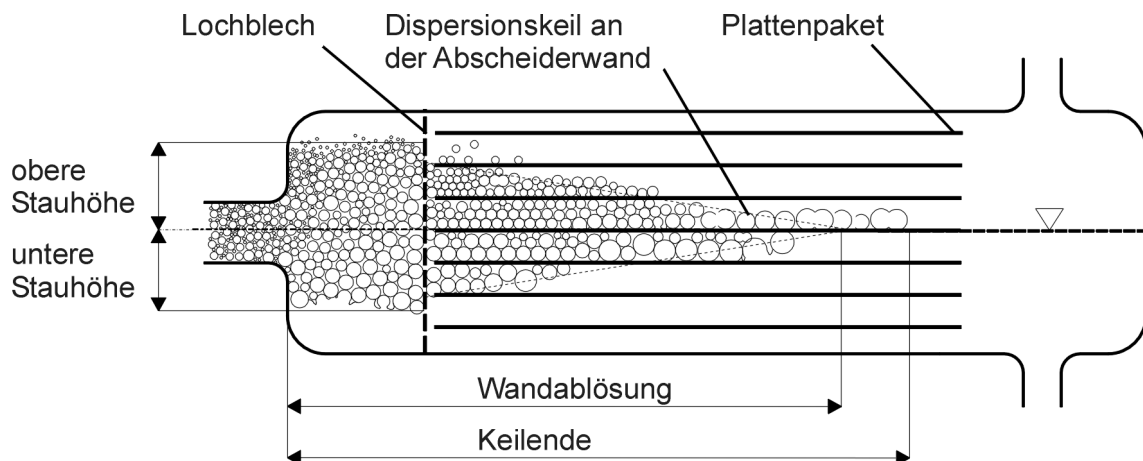


Abb. 3-22: Abscheider mit Plattenpaket mit wesentlichen Messgrößen

Für die Darstellung der Ergebnisse sowie für eine Shortcut-Methode zur Auslegung eines Abscheiders mit Einbauten wird die bezogene Trennlänge $L_{E,bez}$ eingeführt, die als Quotient der Trennlänge im Abscheider mit Einbauten zu der im Abscheider ohne Einbauten definiert ist:

$$L_{E,bez} = \frac{2 \cdot \text{Wandablösung mit Einbauten}}{\text{Wandablösung ohne Einbauten} + \text{Keilende ohne Einbauten}} \quad (3-3)$$

Die ursprünglich klaren Phasen sind beim Verlassen des Abscheiders getrübt, wenn sie noch Anteile an Fremdphase in Form feiner Tropfen enthalten. Abb. 3-23 zeigt einen Abscheiderversuch mit stark getrübter o-Phase und leicht getrübter w-Phase.

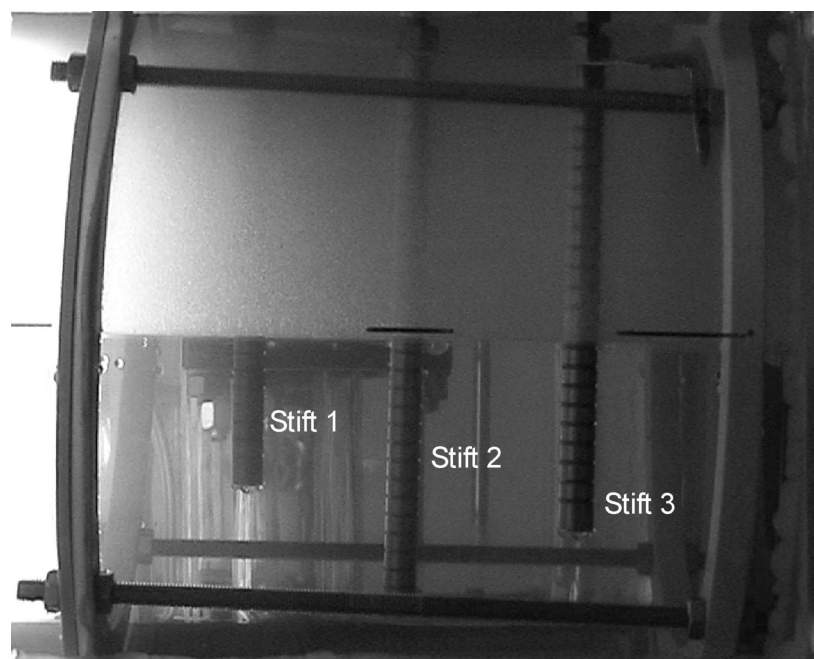


Abb. 3-23: Trübungsmessung (Trübungsgad: o-Phase 4 - 5, w-Phase 2)

Anhand der Trübe kann der nicht abgeschiedene Anteil an Fremdphase abgeschätzt werden. Dies geschieht über die Sichtbarkeit von Stahlstiften (Chatterjee, 1998). Stift 1 ist dabei am weitesten vom Experimentator entfernt (150 mm), Stift 2 befindet sich in der Mitte des Abscheiders (100 mm) und Stift 3 ist nahe der vorderen Abscheiderwand angebracht (50 mm). Die eingedrehten Rillen haben eine Breite von 1 mm und ermöglichen eine Abschätzung des Durchmessers ausgetragener Tropfen. Die Beurteilung der Trübe hängt in gewissem Maß vom Experimentator ab, so dass die Beurteilung der Trübe nach Tab. 3-4 nur eine qualitative Beurteilung der Wirksamkeit des Abscheiders bezüglich der Abscheidung von im Feinstropfen darstellt (Chatterjee, 1998).

Trübegrad	Zustand der Phasen	Sichtbarkeit der Messstifte
1	klar	alle 3 Stifte ungetrübt
2	leichte Trübe	alle Stifte gut erkennbar
3	mittlere Trübe	alle Stifte erkennbar
4	starke Trübe	2 Stifte erkennbar
5	fast vollständig getrübt	1 Stift erkennbar
6	vollständig getrübt	kein Stift erkennbar

Tab. 3-4: Definition der Trübegrade

3.4.3 Vorversuche

Bestimmung der Dispersionsrichtung

Der Vorgang der diskontinuierlichen und der kontinuierlichen Dispersionstrennung wird in hohem Maß von der Dispersionsrichtung (disperse organische Phase oder disperse wässrige Phase) bestimmt. Sie hängt dabei im wesentlichen vom Stoffsystem und dem jeweils eingestellten Phasenverhältnis ab. Liegt ein starker Überschuss an organischer Phase vor, wird die wässrige Phase dispergiert, und umgekehrt. Bei der Bestimmung des genauen Umschlagspunkts tritt eine Art Hysterese auf. Die Lage des Umschlagspunkts ist davon abhängig, ob man sich ihm aus dem Bereich einer dispersen organischen oder einer dispersen wässrigen Phase nähert. Die beiden Dispersionsrichtungen sind also durch einen instabilen Übergangsbereich getrennt,

in dem in Abhängigkeit von der Dispersionserzeugung und der Flüssigkeitsführung beide Dispersionsformen auftreten können. Die Phasenverhältnisse sind bei den Versuchen so zu wählen, dass sie eindeutig außerhalb des Übergangsbereichs liegen. Tab. 3-5 zeigt die unteren und oberen Grenzen der Übergangsbereiche, die durch Vorversuche am Abscheider für die verschiedenen Stoffsysteme ermittelt wurden. Für kleinere Volumenanteile der wässrigen Phase α liegt stets eine disperse wässrige und für größere stets eine disperse organische Phase vor. Außerhalb des angegebenen Umschlagsbereichs wurde stets eine eindeutige Dispersionsrichtung beobachtet. Prinzipiell ist aber bekannt, dass diese Grenzen verschoben werden können, wenn zunächst die kontinuierliche Phase vorgelegt und gerührt wird und dann langsam die Zugabe der zu dispergierenden Phase erfolgt (Mayonnaise, vgl. Selker und Sleicher, 1965). Da hier aber stets beide Phasen im vorgegebenen Phasenverhältnis gemeinsam gemischt werden, sind solche Verschiebungen nicht beobachtet worden.

Stoffsystem Wasser +	Volumenanteil der wässrigen Phase α	
	untere Grenze	obere Grenze
Cyclohexanon	0,35	0,45
n-Butanol	0,36	0,383
Tridecanol	0,104	0,161
Toluol	0,38	0,46
n-Butanol + NaCl	0,36	0,4

Tab. 3-5: Übergangsbereiche der Dispersionsrichtung für verschiedene Stoffsysteme (Henschke, 1995, Schlieper, 2001)

Durchströmung des statischen Mixers

Um eine reproduzierbare Tropfenerzeugung an der Abscheideranlage gewährleisten zu können, muss der statische Mischer bei allen Versuchen einer Versuchreihe von den Phasen des Stoffsystems mit einem einheitlichen Strömungszustand durchströmt werden. Der Strömungszustand hängt dabei von den Stoffdaten, dem Volumenstrom und dem Phasenverhältnis ab. Findet bei einer Änderung der Volumen-

ströme oder des Phasenverhältnisses ein Wechsel des Strömungszustands statt, z. B. von turbulent nach laminar, so ändert sich das Tropfenspektrum, das vom statischen Mischer erzeugt wird, erheblich.

Der Strömungszustand im statischen Mischer kann durch Messung des Strömungsdruckverlusts Δp über der Länge des Mixers L charakterisiert werden. Der Strömungsdruckverlust wird in dimensionsloser Form durch die Newtonzahl beschrieben:

$$Ne = \frac{\Delta p}{\rho_{Dis} \cdot v^2} \cdot \frac{D}{L}, \quad (3-3)$$

wobei D der Durchmesser des Mixers ist, ρ_{Dis} die Dichte der Dispersion und v die Strömungsgeschwindigkeit durch den Mischer. Der Bereich einer turbulenten Durchströmung des statischen Mixers ist dabei durch eine konstante Newtonzahl gekennzeichnet, während sich im Bereich einer laminaren Strömung die Newtonzahl umgekehrt proportional zum Volumenstrom ändert. In Abb. 3-24 sind die Druckverlustmessungen am statischen Mischer für das System Tridecanol + Wasser aufgeführt.

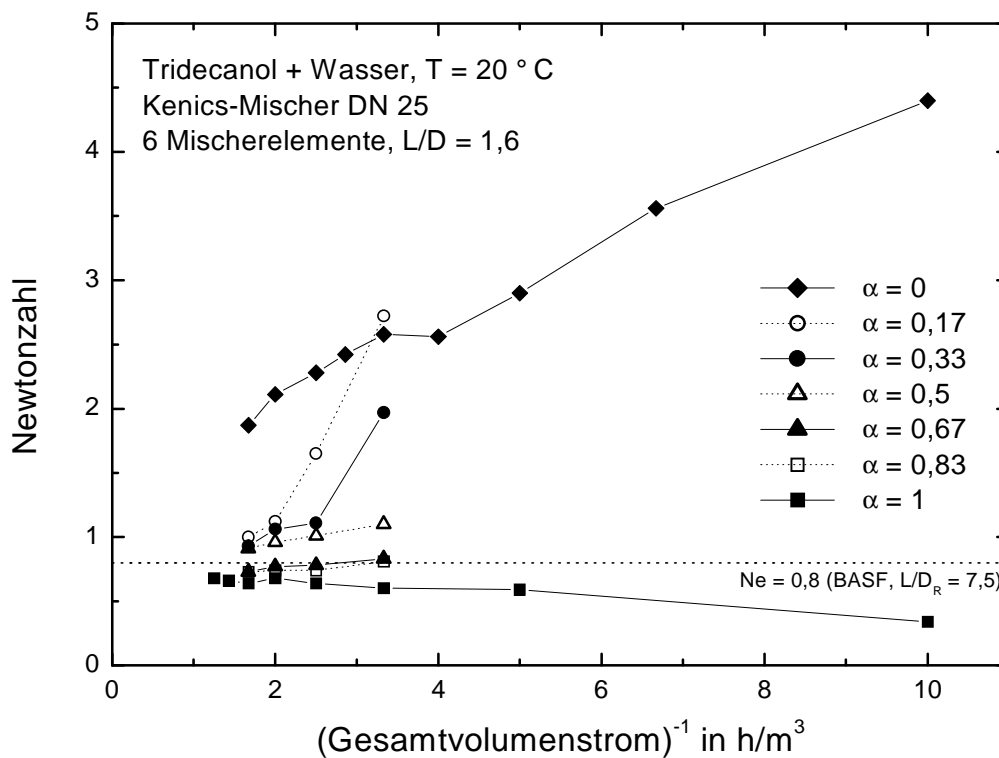


Abb. 3-24: Untersuchung des Druckverlusts am statischen Mischer

Es ist zu erkennen, dass für hohe Volumenanteile der wässrigen Phase eine konstante Newtonzahl und damit eine turbulente Durchströmung vorliegt. Bei niedrigen Volumenanteilen der wässrigen Phase und niedrigen Volumenströmen kommt es aufgrund der hohen Viskosität der organischen Phase zu einem Umschlag in den Bereich einer laminaren Durchströmung. Bei dem System Tridecanol + Wasser liegt also keine einheitliche Dispersionserzeugung im statischen Mischer für das gesamte Parameterfeld vor.

Die anderen eingesetzten Stoffsysteme besitzen einerseits organische Phasen mit wesentlich geringeren Viskositäten und wurden andererseits bei höheren Volumenströmen als das System Tridecanol + Wasser untersucht. Hier kann also von einer durchgängig turbulenten Durchströmung des statischen Mixers und damit einer einheitlichen Tropfenerzeugung für alle Versuche ausgegangen werden.

3.4.4 Durchgeführte Versuche

Nach Abschluss der jeweiligen Vorversuche konnten die Abscheiderversuche mit verschiedenen Stoffsystemen und Einbauten vorgenommen werden. Auch hier sei wieder auf die Abschnitte 3.5 und 3.6 für die Auswahl und Charakterisierung der Einbauten und der Stoffsysteme verwiesen. Bei den Messungen wurden nach Möglichkeit die Abscheiderversuche mit Einbauten unter Verwendung desselben Verteilerlochblechs unmittelbar im Anschluss an die zugehörigen Abscheiderversuche ohne Einbauten durchgeführt. Tab. 3-6 zeigt die an der Abscheideranlage durchgeführten Versuchsreihen.

Bei den Abscheiderversuchen mit dem System Toluol + Wasser wurde anhand der versuchsbegleitenden Absetzversuche in der Schüttelflasche festgestellt, dass die Absetzzeit bei vergleichbaren Versuchsbedingungen stetig und in nicht reproduzierbarer Weise zunahm. Ein Wechsel der eingesetzten Versuchsflüssigkeiten und eine destillative Aufbereitung des Toluols bewirkte eine kurzzeitige Verbesserung der Stoffsystemqualität, die sich jedoch nach wenigen Tagen wieder deutlich verschlechterte. Zudem quoll das in den Platten und den Stützringen des Plattenpakets eingesetzte PP auf und verformte sich so stark, dass das Plattenpaket nur mit großer Mühe wieder aus dem Abscheider entfernt werden konnte. Untersuchungen zur Materialbeständigkeit zeigten, dass PP gegenüber dem System Toluol + Wasser nicht be-

ständig ist und dass daraus eine nicht reproduzierbare Änderung der Stoffsystemqualität resultiert. Der Werkstoff PVDF wies dabei eine höhere Beständigkeit als PP auf und ist deshalb zukünftig als alternatives Einbautenmaterial denkbar (siehe Anhang 7.5).

Stoffsystem Wasser +			Dispersions- erzeugung	Lochblech	Einbau	Charakteristische Abmessung	Material
Tridecanol	Toluol	n-Butanol + NaCl					
x	x	x	Stat. Mischer	A	Platten	10 mm	Edelstahl
x	x		Stat. Mischer	C	Platten	10 mm	Edelstahl
x		x	Stat. Mischer	A	Platten	10 mm	PP
x			Stat. Mischer	A	Platten	46 mm	Edelstahl
x			Stat. Mischer	A	Platten	46 mm	PP
	x	x	Stat. Mischer	A	Pall-Ringe	15 mm	Edelstahl
		x	Stat. Mischer	A	Pall-Ringe	15 mm	PP

Tab. 3-6: Durchgeführte Versuchsreihen an der Abscheideranlage

Bei den Versuchen mit Tridecanol zeigten sich nach wenigen Versuchstagen nachhaltige Veränderungen im Stoffsystem, die sich durch eine deutlich verlängerte Absetzzeit bemerkbar machte. Dies ist in Abb. 3-25 dokumentiert. Es zeigte sich, dass auch hier ein Austausch der Phasen nur kurzfristig Erfolg hatte. Beständigkeitsversuche gaben keine Hinweise auf mögliche Ursachen für diesen Effekt. Nach längerem Betrieb des Abscheiders zeigte sich aber ein leichter Film, der auf der Phasengrenze am Ende des Abscheiders schwamm (vgl. Abb. 3-26). Dieser Film ist vermutlich eine erste Stufe von sich entwickelndem Mulm. Nach einigen Versuchen konnten im Mikroskop Mikroorganismen in dieser Schicht nachgewiesen werden. Allerdings gelang dies nicht bei allen Versuchen. Bei den zwischenzeitlichen Reinigungen der Anlage wurde teilweise auch verdünnte Säure mit nur mittelfristigem Erfolg eingesetzt. Da die Untersuchung eines Systems mit höherer Viskosität ein zentrales Ziel des Projek-

tes war, wurden die Versuche trotz der Probleme mit einem erheblichen zusätzlichen Reinigungsaufwand durchgeführt.

Abb. 3-25: Absetzzeiten im Tridecanol-System über der Versuchsdauer. In Klammern sind die Zeitpunkte von Phasentausch und Reinigungsarbeiten angegeben.

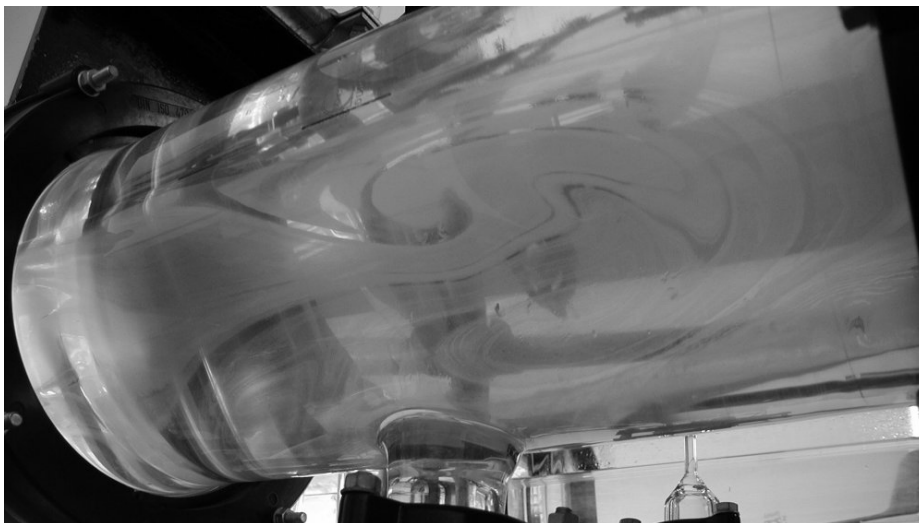


Abb. 3-26: Film in der Phasengrenze bei dem Tridecanol-System

Parameterfeld

Die Eingrenzung der in einer Versuchreihe zu untersuchenden Parameter war vom jeweiligen Stoffsystem abhängig. Bei der Wahl der einzustellenden Phasenverhältnisse sollten möglichst beide Dispersionsrichtungen berücksichtigt werden. Beim System Tridecanol + Wasser liegt jedoch der Übergangsbereich bei sehr niedrigen Volumenanteilen der wässrigen Phase, so dass nur Versuche bei disperser organischer Phase durchgeführt wurden. Beim System Toluol + Wasser ist die Dispersions-trennung bei disperser wässriger Phase so schnell abgeschlossen, dass im Abscheider mit Einbauten auch bei sehr hohen Volumenströmen nach dem Verteilerlochblech keine oder nur sehr kurze Dispersionskeile mit Längen unter 100 mm aufgenommen werden konnten. Die Messungen der Keillänge haben bei solch niedrigen Messwerten hohe relative Fehler und besitzen daher nur geringe Aussagekraft. Aus diesem Grund wurden auch beim System Toluol + Wasser nur Versuche mit disperser organischer Phase durchgeführt.

Der Parameter Volumenstrom wurde für die Stoffsysteme jeweils so eingegrenzt, dass beim niedrigsten Volumenstrom gerade ein deutlicher und gut zu vermessender Dispersionskeil entstehen und beim höchsten Volumenstrom das Plattenpaket mit dem Dispersionskeil voll beaufschlagt werden kann, ohne jedoch überlastet zu werden. Da die Dispersionstrennung bei den verschiedenen Stoffsystemen unterschiedlich schnell abgeschlossen ist, weichen die untersuchten Volumenstrombereiche voneinander ab. Tab. 3-7 zeigt die Parameterfelder der Versuchreihen an der Abscheideranlage für die verschiedenen Stoffsysteme.

Stoffsystem Wasser +	α		\dot{V}
	wässrige Phase dispers	organische Phase dispers	m ³ /h
Tridecanol	-	0,17 / 0,33 / 0,5 / 0,67 / 0,83	0,3 / 0,4 / 0,5 / 0,6
Toluol	-	0,5 / 0,67 / 0,83	0,8 / 1,0 / 1,2 / 1,4
n-Butanol + NaCl	0,17 / 0,25	0,5 / 0,75	0,4 / 0,6 / 0,8 / 1,0

Tab. 3-7: Parameterfelder der Versuchsreihen an der Abscheideranlage für verschiedene Stoffsysteme

Abscheiderversuche

Die Versuche an der Abscheideranlage dienen im wesentlichen dazu, die experimentelle Datenbasis zu erweitern, die von Chatterjee (1998) und Schlieper (2001) geschaffen wurde. Zudem dienen die Abscheiderversuche dem Abgleich verbesserter und neu entwickelter Modelle zur Auslegung liegender Flüssig-Flüssig-Abscheider mit Einbauten. Der Schwerpunkt lag dabei auf längsangeströmten Plattenpaketen. Im Rahmen der Versuche an der Abscheideranlage wurden verschiedene Einflüsse auf die Dispersionstrennung untersucht, wie z. B. die Stoffsystemeigenschaften, das Verteilerlochblech, der Plattenabstand und das Plattenmaterial. Neben den Plattenpaketen wurden zusätzlich Füllkörperpackungen bei der Dispersionstrennung im Abscheider eingesetzt und untersucht. Im folgenden werden beispielhaft Ergebnisse zu den wichtigsten untersuchten Einflussgrößen auf die Dispersionstrennung im Abscheider vorgestellt. Um eine Vergleichbarkeit mit Daten aus der Industrie zu vereinfachen, enthält Tabelle 3-8 die Umrechnung entsprechender Einheiten.

Volumenstrom	
l/h	m ³ /(m ² h)
100	3,2
200	6,4
300	9,5
400	12,7
500	15,9
600	19,1
700	22,3
800	25,5
900	28,6
1000	31,8
1100	35,0
1200	38,2
1300	41,4
1400	44,6

Tab. 3-8: Einheitenäquivalenz

Abb. 3-27 verdeutlicht den Einfluss der Stoffsystemeigenschaften auf die Dispersionsstrennung im Abscheider mit Platteneinbauten.

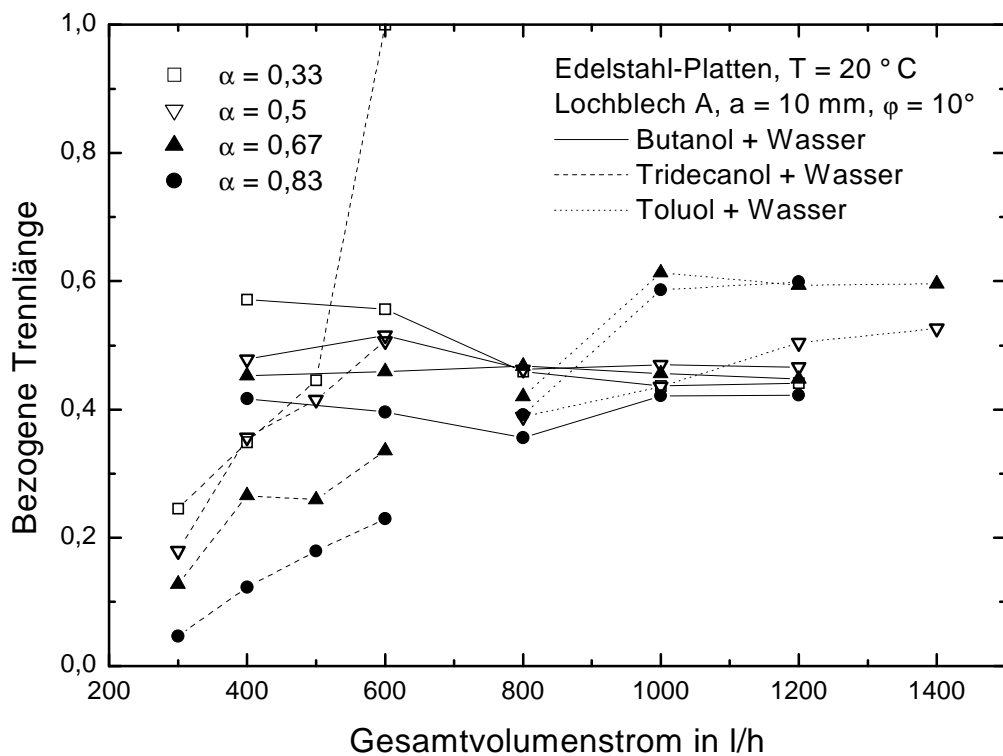


Abb. 3-27: Einfluss der Stoffsystemeigenschaften auf die Trennwirksamkeit

Die bezogene Trennlänge des hochviskosen Systems Tridecanol + Wasser ist im hohen Maß vom Gesamtvolumenstrom abhängig. Mit steigenden Volumenströmen nimmt die bezogene Trennlänge zu und damit die Trennwirksamkeit ab. Bei hohen Volumenströmen kommt es hier sogar zur Überlastung des Plattenpakets, in deren Folge der Einsatz des Plattenpakets keine Verkürzung der Trennlänge bewirkt ($L_{E,bez} = 1$). Im Gegensatz dazu bleiben die bezogenen Trennlängen der niedrigviskosen Systeme n-Butanol + Wasser und Toluol + Wasser bei Variation des Gesamtvolumenstroms nahezu konstant. Je höher also die Viskositäten der beteiligten Phasen sind, desto stärker ist die Trennwirksamkeit vom Volumenstrom abhängig.

Auch der Einfluss des Phasenverhältnisses auf die Trennwirksamkeit wird von der Viskosität der beteiligten Phasen bestimmt. Beim hochviskosen System Tridecanol + Wasser ist die Abhängigkeit der bezogenen Trennlänge vom Phasenverhältnis am deutlichsten ausgeprägt. Da hier stets die organische Phase dispers ist und die organische Phase die hochviskose ist, nimmt die bezogene Trennlänge mit steigendem Dispersphasenanteil (sinkendem Volumenanteil der wässrigen Phase) zu und damit die Trennwirksamkeit ab. Das gleiche Verhalten ist tendenziell beim System n-Butanol + Wasser zu erkennen. Da hier das Viskositätsverhältnis η_o / η_w aber nur

2,3 gegenüber 33,6 beim System Tridecanol + Wasser beträgt, fallen die Änderungen der bezogenen Trennlänge nur sehr gering aus. Beim System Toluol + Wasser ist dagegen die wässrige Phase die hochviskose ($\eta_o / \eta_w = 0,6$). Mit steigendem Dispersphasenanteil nimmt hier die bezogene Trennlänge ab und damit die Trennwirksamkeit zu.

Der Einfluss des Verteilerlochblechs auf die anschließende Dispersionstrennung im Plattenpaket wird aus Abb. 3-28 ersichtlich.

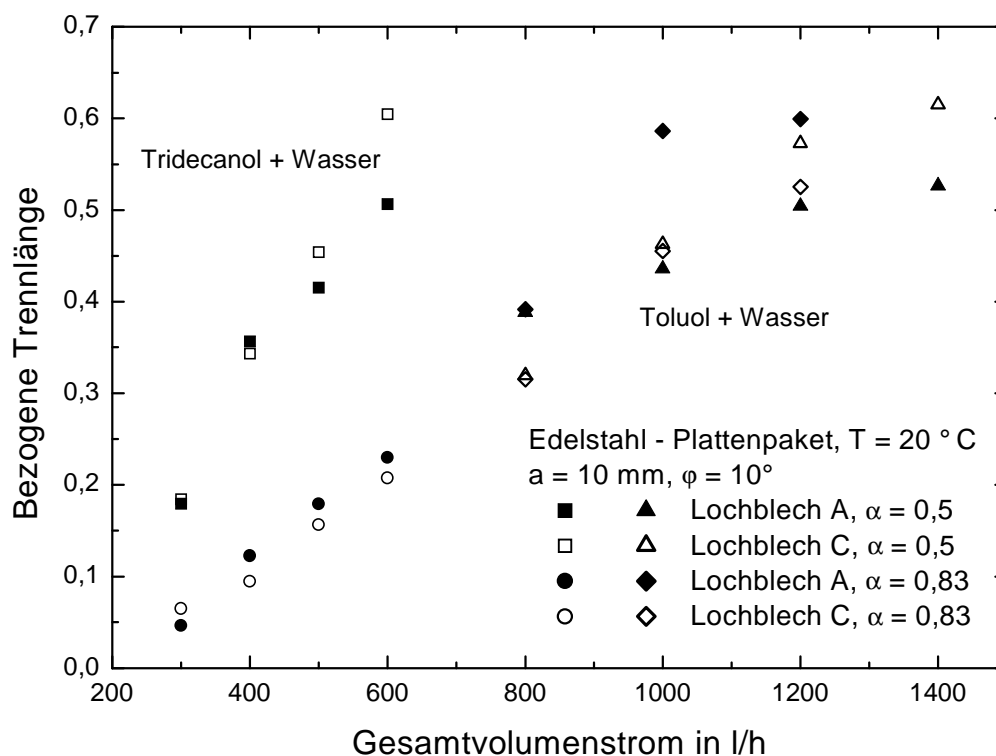


Abb. 3-28: Einfluss des Verteilerlochblechs auf die Trennwirksamkeit

Bei niedrigen Dispersphasenanteilen bewirkt eine ungleichmäßige Dispersionsverteilung (Lochblech C) bei beiden Systemen eine verbesserte Trennwirksamkeit, indem die ansonsten flachen und langgestreckten Dispersionskeile durch das Verteilerlochblech aufgefächert und auf das Plattenpaket verteilt werden. Die Verbesserung der Trennwirksamkeit fällt hierbei für das System Toluol + Wasser etwas deutlicher aus. Dagegen bewirkt eine ungleichmäßige Dispersionsverteilung bei hohen Dispersphasenanteilen eine Abnahme der bezogenen Trennlänge. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass eine Auffächerung der ohnehin schon mächtigen Dispersionskeile zu Turbulenzen führt, die erst im anschließenden Plattenpaket abgebaut werden müs-

sen und so den Trennvorgang verlängern. Dafür spricht insbesondere, dass der nachteilige Effekt der ungleichmäßigen Dispersionsverteilung bei hohen Dispersphasenanteilen mit steigenden Volumenströmen immer ausgeprägter wird.

In Abb. 3-29 werden Abscheiderversuche mit dem System Tridecanol + Wasser für verschiedene Plattenabstände im Plattenpaket gezeigt.

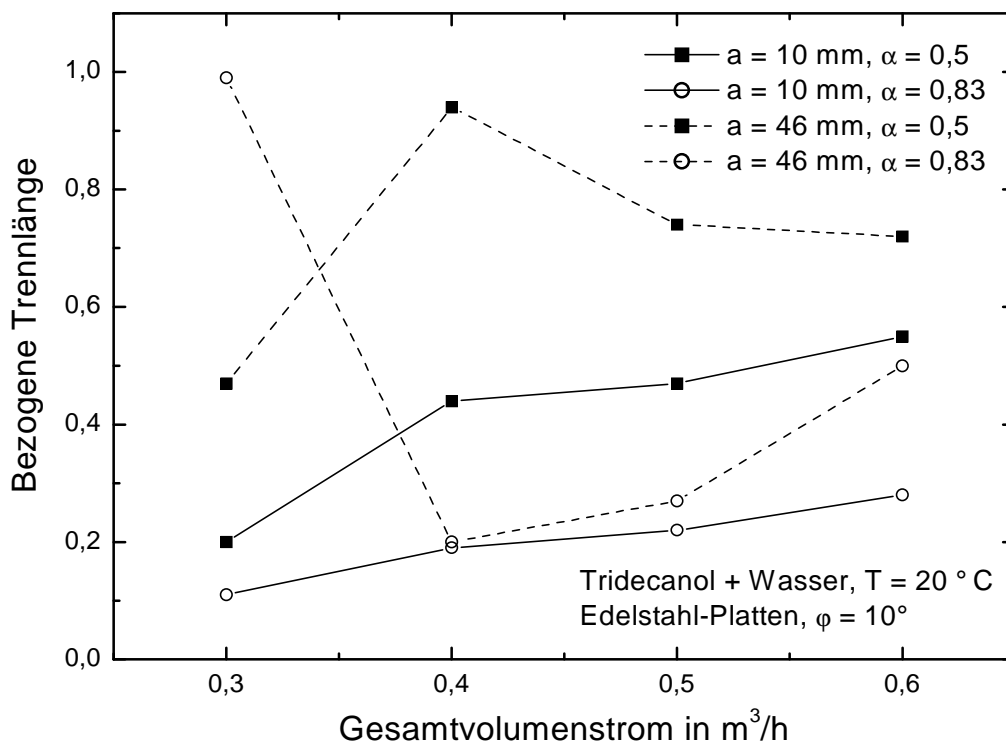


Abb. 3-29: Variation des Plattenabstands

Es zeigt sich zunächst wie erwartet, dass ein geringerer Plattenabstand in allen Versuchen zu geringeren bezogenen Trennlängen führt. Dieser Effekt wird dabei umso deutlicher, je größer der Dispersphasenanteil ist. Bei niedrigen Dispersphasenanteilen und niedrigen Gesamtvolumenströmen ist die Trennwirksamkeit der Plattenpakete mit unterschiedlichen Plattenabständen nahezu gleich. Bei sehr großen Plattenabständen ($a = 46 \text{ mm}$, $\dot{V}_{\text{ges}} = 300 \text{ l/h}$) kann es passieren, dass der aufgrund der geringen Dispersionsmenge nur sehr flache Dispersionskeil mit keiner Platte des Pakets in Kontakt kommt und sich so ungehindert wie in einem Abscheider ohne Einbauten zwischen den Platten ausbreitet. Die Platten bewirken hier lediglich eine Strömungsführung und -beruhigung. Die Trennlänge verkürzt sich in diesem Fall nur unmerklich.

Abb. 3-30 zeigt Versuche mit den Systemen Tridecanol + Wasser und n-Butanol + Wasser + NaCl unter Verwendung verschiedener Plattenmaterialien.

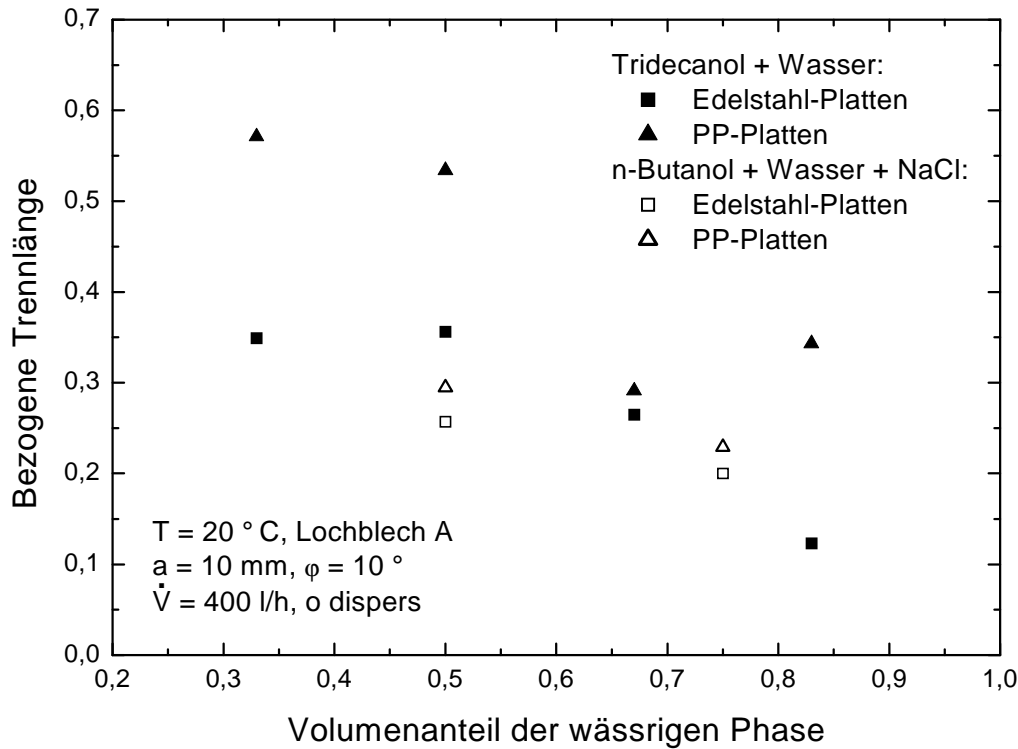


Abb. 3-30: Variation des Plattenmaterials

Die verschiedenen verwendeten Plattenmaterialien führen zu deutlich unterschiedlichen Trennergebnissen. Dabei zeigt sich, dass Edelstahl-Platten in allen Versuchen kleinere bezogene Trennlängen bewirken als PP-Platten. Der Grund dafür liegt in den unterschiedlichen Benetzungseigenschaften der verschiedenen Plattenmaterialien durch die disperse Phase, in diesem Fall also der organischen Phase. Die Edelstahl-Platten werden in beiden Fällen schlechter durch die disperse Phase benetzt als die PP-Platten (Schlieper, 2001). Dadurch werden die Tropfen auf den Platten von der Strömung oder nachfolgenden Tropfen vorangeschoben, ohne dabei die Platte zu benetzen. Es kommt so vermehrt zu Tropfen-Tropfen-Koaleszenz in Strömungsrichtung, was zu einer deutlich schnelleren Trennung führt.

Der Unterschied in den bezogenen Trennlängen für die beiden Plattenmaterialien fällt dabei für das System Tridecanol + Wasser deutlicher aus. Da dieses System für eine disperse organische Phase gegenüber dem System n-Butanol + Wasser + Salz

sehr langsam koalesziert, wirken sich hier das Aufstauen der Tropfen zwischen den Platten und die vermehrte Tropfen-Tropfen-Koaleszenz viel stärker aus.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden neben Platteneinbauten auch Füllkörperpackungen im kontinuierlich betriebenen Abscheider bezüglich ihrer Trennwirksamkeit untersucht. In Abb. 3-31 sind die bezogenen Trennlängen von Packungen mit verschiedenen Pall-Ringen aufgetragen.

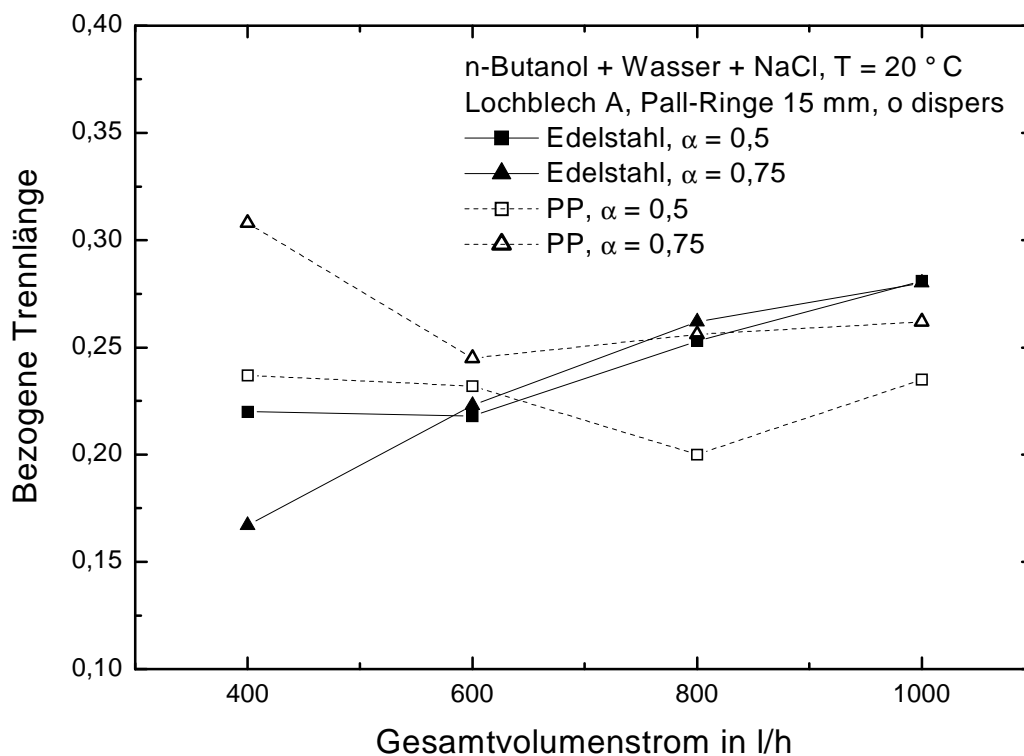


Abb. 3-31: Trennwirksamkeit verschiedener Füllkörperpackungen im Abscheider

Es zeigt sich, dass bei den Versuchen mit Füllkörpern eine Verkürzung der Trennlänge um bis zu 85 %, mindestens aber um 70 % erreicht wird. Eine merkliche Abhängigkeit der bezogenen Trennlänge von Plattenmaterial, Phasenverhältnis und Gesamtvolumenstrom konnte nicht festgestellt werden.

Absetzversuch

Der Absetzversuch am Abscheider wird begleitend zu jedem Versuch an der kontinuierlich betriebenen Abscheideranlage durchgeführt. Neben der fortlaufenden Überprüfung der Stoffsystemqualität dient er der Charakterisierung des Stoffsystems und

kann zur Auslegung von Abscheidern ohne Einbauten verwendet werden. Wie in 3.4.2 dargelegt wurde, ändern sich aufgrund der Dispersionsentnahme beim Absetzversuch der Betriebszustand der Kreiselpumpen und damit sowohl die Volumenströme der einzelnen Phasen als auch das Phasenverhältnis. Der Asymmetrieparameter, der das Stoffsystem bezüglich der Koaleszenzeigenschaften charakterisiert, ist für ein Stoffsystem aber nicht vom Phasenverhältnis sondern nur von der Dispersionsrichtung abhängig und kann deshalb auch mit dem Absetzversuch am Abscheider ermittelt werden. Eine indirekte Messung der Tropfengröße im Abscheidereingang mittels des Absetzversuchs ist aber aufgrund der Änderung des Volumenstroms nicht oder nur näherungsweise möglich.

Abb. 3-32 zeigt Absetzversuche am Abscheider mit dem System n-Butanol + Wasser + NaCl bei einem Gesamtvolumenstrom von 800 l/h im Vergleich zu den dazugehörigen Absetzversuchen in der Rührzelle. Anhand dieser Versuche kann beurteilt werden, ob der Absetzversuch am Abscheider ebenfalls zur Charakterisierung des Stoffsystems genutzt werden kann.

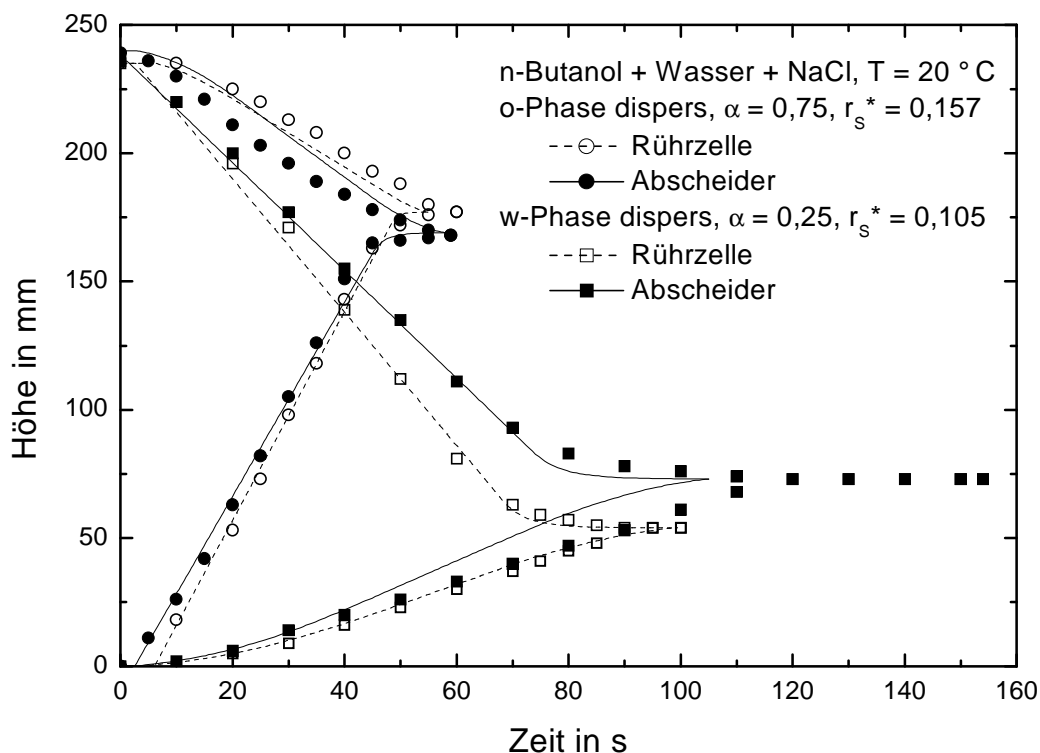


Abb. 3-32: Absetzversuche am Abscheider und in der Rührzelle mit dem System n-Butanol + Wasser + NaCl

Auf den ersten Blick weichen die Absetzkurven der beiden Absetzversuche, insbesondere für eine disperse wässrige Phase, stark voneinander ab. Hierbei ist allerdings neben leicht unterschiedlichen Füllhöhen zu berücksichtigen, dass in den Versuchen unterschiedliche Dispersionserzeugungen (Rührwerk bzw. statischer Mischer) eingesetzt wurden. Die Steigungen der Sedimentationskurven bei den Absetzversuchen am Abscheider sind insbesondere bei disperser wässriger Phase flacher als die beim Absetzversuch in der Rührzelle, was gleichbedeutend mit einem geringeren mittleren Anfangstropfendurchmesser ist. Dies erklärt die hier deutlich längere Trennzeit.

Um die Vergleichbarkeit der beiden Versuche bewerten zu können, ist es deshalb notwendig, die Übereinstimmung der gemessenen und der berechneten Absetzkurven zu prüfen. Die Berechnung der Absetzkurven erfolgte dabei für beide Absetzversuche mit den Asymmetrieparametern aus Tab. 3-2. Es zeigt sich, dass beide Absetzversuche mit denselben Asymmetrieparametern gut beschrieben werden können. Dies trifft insbesondere für die Versuche mit disperser organischer Phase zu. Bei den Versuchen mit disperser wässriger Phase wird beim Absetzversuch am Abscheider eine deutlicher längere Absetzzeit gemessen als mit dem Modell berechnet. Im Experiment beträgt dabei die Zeitspanne zwischen dem Zeitpunkt, an dem nur noch eine einzige Tropfenschicht vorhanden ist, und dem Abbruchkriterium fast 40 s. Dies entspricht in etwa 25 % der gesamten Absetzzeit. Dieser meist stochastische Vorgang, in dem die letzten Tropfen an der Phasengrenze koaleszieren, kann jedoch vom Modell nicht erfasst werden. Der prinzipielle Verlauf der Koaleszenzkurve wird auch hier zufriedenstellend abgebildet. Dies zeigt hier auch noch einmal, dass das Modell von Henschke in gewissen Grenzen in der Lage ist, die Dispersionstrennung unabhängig von der Ausgangsgröße der Tropfen und ihrer Größenverteilung zu beschreiben.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Charakterisierung des Stoffsystems unter Verwendung des Absetzversuchs in der Rührzelle eine größere Genauigkeit aufweist. Dies liegt im wesentlichen an der Dispersionserzeugung durch ein Rührwerks, die genauer eingestellt und besser reproduziert werden kann. Für eine schnelle Charakterisierung des Stoffsystems, bei dem auch eine geringere Genauigkeit zu-

gelassen werden kann, oder zur Kontrolle der Stoffsystemqualität ist der Absetzversuch am Abscheider jedoch durchaus sinnvoll.

3.5 Verwendete Einbauten

In den Versuchen am Technikumsabscheider und dem Absetzversuch mit Einbauten wurden verschiedene Einbautentypen und -ausführungen untersucht. Neben Platten und Füllkörpern, die den Schwerpunkt der Untersuchungen dieses Forschungsvorhabens bilden, wurden im Absetzversuch zusätzlich beispielhaft strukturierte Packungen und Gestricke eingesetzt. Im folgenden werden die wesentlichen Merkmale der verwendeten Einbauten und ihre konstruktive Ausführung für den Einsatz in den durchgeführten Versuchen diskutiert.

Platten

Im Technikumsabscheider wurden schwerpunktmäßig längsangeströmte Plattenpakete untersucht, wobei Plattenabstände von 10, 22 und 46 mm mit einem konstanten Neigungswinkel der Platten von 10° realisiert wurden (siehe Abb. 3-33). Die Plattenpakete haben eine Gesamtlänge von 960 mm. Zur Stabilisierung der Plattenpaketkonstruktion und zur Verhinderung einer Wandgängigkeit der Dispersion wurden Stützringe aus Polypropylen verwendet, die zur Abscheiderwand hin mit einer PTFE-Dichtung versehen sind. Als Plattenwerkstoffe wurden Polypropylen (PP), Edelstahl und versuchsweise Polyvinylidenfluorid (PVDF) eingesetzt. Die Einbauten aus PP zeigten sich in den Versuchen mit Toluol als nicht beständig, die Absetzzeit veränderte sich in kürzester Zeit signifikant und es konnte ein Quellen der Einbauten beobachtet werden. PVDF wurde als eine mögliche Alternative getestet, die sich in ersten Vorversuchen beständig gezeigt hat (vgl. Abschnitt 7.5).

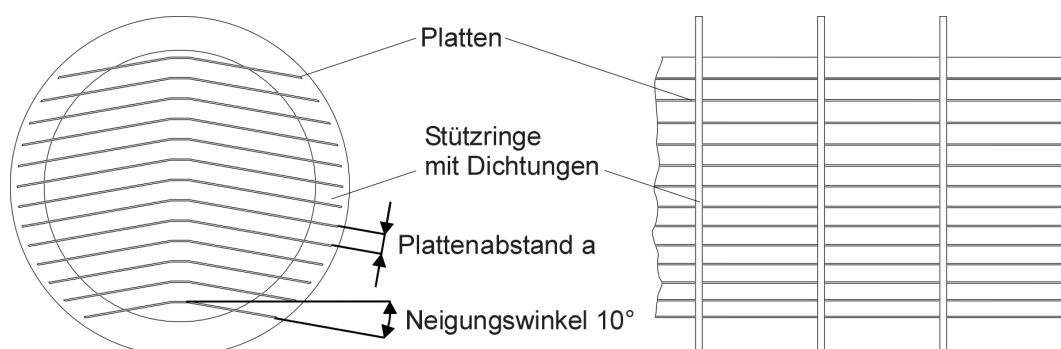


Abb. 3-33: Prinzipskizze der verwendeten Plattenpakete

Die dachförmigen Platten des Paketes besitzen im oberen Knick Langlochbohrungen, durch die die koaleszierte leichtere Phase nach oben abströmen kann. Durch einen Freiraum zwischen der Außenkante der Platten und der Abscheiderwand kann die koaleszierte schwere Phase abfließen.

Für den Absetzversuch in der Rührzelle mit Einbauten wurde ein Einbau konstruiert, der dem Plattenpaket im Technikumsabscheider bezüglich Plattendicke, -material, -abstand und -neigungswinkel weitestgehend nachempfunden ist (siehe Abb. 3-34). Auch bei diesem Plattenpaket ist zwischen den oberen und unteren Plattenaußenkanten und der Wand des Glaszylinders ein Abstand vorgesehen, der ein Abfließen der koaleszierten Phasen nach oben und unten ermöglicht.

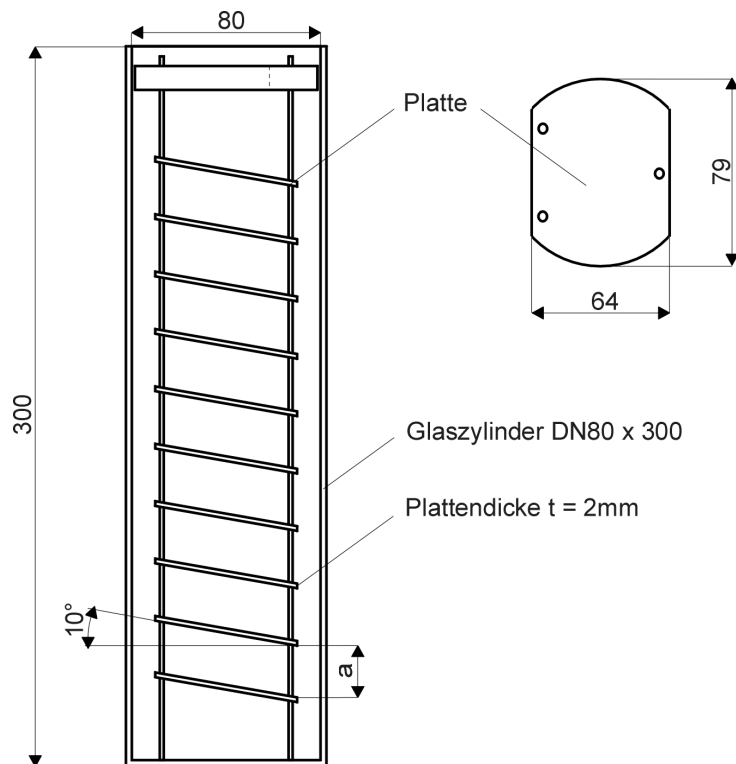


Abb. 3-34: Plattenpaket für den Absetzversuch mit Einbauten

Füllkörper

Eine preiswerte und einfach zu handhabende Einbautenform stellen Packungen aus Füllkörpern dar, die in vielen verschiedenen Formen und Materialien hergestellt werden. Im Technikumsabscheider wurden Packungen aus Pall-Ringen DN 15 aus Edelstahl und PP untersucht, wobei diese als lose Schüttungen direkt in den Abscheider eingesetzt wurden. Die Schüttungen wurden dabei in radialer Richtung durch den

Glassschuss des Abscheiders und in axialer Richtung durch Stützringe mit einem Edelstahldrahtgewebe (Drahtdurchmesser 1,8 mm, Maschenweite 10 mm) zusammengehalten. Die Länge der Füllkörperpackungen betrug dabei wie bei den Plattenpaketen 960 mm.

Im Absetzversuch mit Einbauten wurden beispielhaft als weitere Füllkörpervarianten jeweils aus Edelstahl Interpak DN 15 und DN 20, Pall-Ringe DN 25 und Raschig Super-Ringe 0,3 und 0,7 eingesetzt. Tab. 3-1 gibt einen Überblick über die Spezifikationen der verschiedenen eingesetzten Füllkörper.

Füllkörper	Nenngröße	Werkstoff	Spezifisches Gewicht	Spezifische Oberfläche	Spezifisches freies Volumen
			kg/m ³	m ² /m ³	m ³ /m ³
Pall-Ring	DN 15	Edelstahl	360 – 385	310 – 360	0,95
	DN 15	PP	80 – 110	350	0,88 – 0,91
	DN 25	Edelstahl	385	195 – 215	0,95
Interpak	DN 15	Edelstahl	345	360	0,96
	DN 20	Edelstahl	350	260	0,96
Raschig	0,3	Edelstahl	340	315	0,96
Super-Ring	0,7	Edelstahl	185	180	0,98

Tab. 3-9: Spezifikationen der eingesetzten Füllkörper

Strukturierte Packungen

Strukturierte Packungen sind bezüglich ihrer geometrischen Spezifikationen vergleichbar mit Füllkörperpackungen, sind aber in der Regel kostenintensiver. Beispielhaft wurde in diesem Forschungsvorhaben die Packung Rombopak der Kühni AG, Allschwil, Schweiz, eingesetzt, die aus einer Vielzahl schmaler Wellblechlamellen gefertigt wird. Die Spezifikationen der eingesetzten Varianten Rombopak 9M und 12M aus Edelstahl sind in Tab. 3-10 aufgeführt.

Packung	Werkstoff	Spezifisches Gewicht	Spezifische Oberfläche	Spezifisches freies Volumen
		kg/m ³	m ² /m ³	m ³ /m ³
Rombopak 9M	Edelstahl	160 - 200	320 – 350	n. n.
Rombopak 12M	Edelstahl	n. n.	450	n. n.

Tab. 3-10: Spezifikationen der eingesetzten strukturierten Packungen

Gestrickpackungen

Eine weitere wirkungsvolle Form der Einbauten stellen Gestrickpackungen dar. Bei kleinen Abmessungen der Drahtgestricke findet hier ein Übergang zu Faserbetten und damit zu Faserbettabscheidern statt. Bei den durchgeführten Versuchen wurde deshalb ein grobmaschiges Gestrick der Firma Rhodius GmbH, Weissenburg, in Wickelrollenausführung verwendet. Die Wickelrolle hatte einen Durchmesser von 80 mm und eine Höhe von 250 mm. Das Gestrick wurde aus Edelstahldrähten mit einem Durchmesser von 0,7 mm gefertigt und besitzt eine Maschenweiten von 10 mm in horizontaler und 20 mm in vertikaler Richtung. Das spezifische Gewicht des Gestricks beträgt 500 kg/m³ und die spezifische Oberfläche 361,7 m²/m³.

3.6 Auswahl der Stoffsysteme

In Hinblick auf eine Modellierung der Dispersionstrennung im Abscheider mit Einbauten ist eine systematische Variation der Stoffsystemeigenschaften besonders wichtig. Dabei interessieren insbesondere die Eigenschaften, die die Koaleszenz- und Strömungsvorgänge maßgeblich beeinflussen. Die wesentlichen Größen sind:

- Dichte der dispersen und kontinuierlichen Phase
- Viskosität der dispersen und kontinuierlichen Phase
- Grenzflächenspannung zwischen disperser und kontinuierlichen Phase
- Absetzzeit

Darüber hinaus sollten die Stoffsysteme minder toxisch, nicht brennbar und chemisch stabil sein. Besonderes Ziel in diesem Projekt war dabei einerseits, auch ein System zu untersuchen, an dem eine höherviskose Phase beteiligt ist, und andererseits ein

Testsystem zu untersuchen, das eine technisch relevante längere Absetzzeit aufweist. Diese Randbedingungen führten zur Auswahl der Systeme Tridecanol + Wasser, Cyclohexanon + Wasser, Toluol + Wasser und n-Butanol + Wasser, deren Stoffdaten für gegeneinander abgesättigte Phasen in Tab. 3-11 aufgeführt sind.

Eigenschaften		Stoffsystem Wasser +			
		Tridecanol	n-Butanol (+ NaCl)	Cyclohexanon	Toluol
$w_{o,o}$	kg/kg	0,98	0,80	0,92	~1
$w_{w,w}$	kg/kg	~1	0,92	0,977	~1
ρ_o	kg/m ³	851	846	953	866
ρ_w	kg/m ³	999	987	999	998
$\Delta\rho$	kg/m ³	148	141	46	132
η_o	mPas	33,3	3,324	2,306	0,592
η_w	mPas	0,99	1,463	1,323	1,001
σ	mN/m	15,2	1,75	3,8	35,2
Quellenangaben		Wagner, 1999	Misek, 1985 Henschke, 1995	Amasheh, 1989	Misek, 1985

Tab. 3-11: Stoffdaten der bei 20 ° C gegeneinander abgesättigten Phasen für verschiedene Stoffsysteme

Das System Cyclohexanon + Wasser zeichnet sich durch eine niedrige Dichtedifferenz von 46 kg/m³ gegenüber den anderen Systemen mit Dichtedifferenzen von 132 bis 148 kg/m³ aus. Das System n-Butanol + Wasser besitzt mit 1,75 mN/m die niedrigste und das System Toluol + Wasser mit 35,2 mN/m die höchste Grenzflächenspannung aller verwendeten Systeme. Eine sehr hohe Viskosität der organischen Phase weist das System Tridecanol + Wasser mit 33,3 mPas auf. Das System Toluol + Wasser dagegen ist das einzige hier verwendete System, bei dem die Viskosität der organischen Phase niedriger als die der wässrigen Phase ist.

Um eine längere Absetzzeit realisieren zu können, wurde in mehreren Diskussionen mit den Projektbegleitern mögliche Systeme festgelegt und anschließend im Labor

auf Absetzzeit, Reproduzierbarkeit und Beständigkeit der Werte überprüft. Keines der getesteten Systemen zeigte dabei das gesuchte Verhalten. Nach diesen vergeblichen Versuchen wurde als Alternative auf Erfahrungen am Lehrstuhl mit salzhaltigen Systemen zurückgegriffen, auch wenn diese Zugabe zunächst nicht als optimal angesehen wurde. Im System n-Butanol + Wasser wurde daher in einer zusätzlichen Versuchsreihe die Absetzzeiten durch die Zugabe einer geringen Menge Salz ($c_{\text{NaCl}} \cong 4 \cdot 10^{-2} \text{ g}_{\text{NaCl}}/\text{l}_{\text{H}_2\text{O}}$, Natriumchlorid zur Analyse, Merck KGaA, Darmstadt) bei ansonsten unveränderten Stoffdaten erhöht. Eine merkliche Änderung der Absetzzeit findet hierbei nur bei disperser wässriger Phase statt. Die Salzkonzentration wurde so eingestellt, dass bei einer dispersen wässrigen Phase im Absetzversuch am Abscheider ($\dot{V} = 800 \text{ l/h}$, $\alpha = 0,25$) eine Absetzzeit von etwa 170 s erreicht wird (Absetzzeit für denselben Versuch ohne Salzzugabe: $t_E \cong 35 \text{ s}$). Eine Ursache für diesen Salzeffekt liegt in dem Einfluss der Elektrolyte auf die elektrostatische Doppelschicht an der Phasengrenze, die die Wechselwirkung zwischen zwei Tropfen und damit die Koaleszenz maßgeblich bestimmt (Pfennig, 2004). Die Absetzzeit für eine disperse organische Phase ($\dot{V} = 800 \text{ l/h}$, $\alpha = 0,75$) beträgt durch die Salzzugabe unverändert etwa 60 s. Es kann davon ausgegangen werden, dass alle übrigen Stoffdaten des Systems n-Butanol + Wasser durch die Salzzugabe aufgrund der geringen Konzentration nicht messbar verändert werden.

Für alle Untersuchungen wurden technisch reine Lösungsmittel eingesetzt, wobei es sich bei dem verwendeten Tridecanol um ein Isomerengemisch mit dem Markennamen "Exxal 13" handelte. Toluol, Cyclohexanon und Tridecanol wurden von der Bayer AG und n-Butanol von der BASF AG als Chemikalienspenden zur Verfügung gestellt. Tab. 3-12 enthält die Spezifikationen der gelieferten Lösungsmittel.

Stoff	Hersteller	Chargen-Nr.	Reinheit
Toluol	Brenntag, Mülheim a. d. Ruhr	110141	99,9 %
		110202	99,9 %
Cyclohexanon	Bayer Chemie Service, Köln	79P381	99,92 %
Tridecanol (Exxal 13)	GB-Chemie, Messel	L000924	-
n-Butanol	BASF, Ludwigshafen	75773856P0	-

Tab. 3-12: Spezifikationen der gelieferten Lösungsmittel

Wie bereits erwähnt, zeigte sich im Verlauf der Untersuchungen, dass die Einbauten aus PP nicht beständig gegenüber dem Toluol-System sind. Für das Tridecanol-Systeme ergaben sich wie ebenfalls erwähnt Probleme mit der längerfristigen Stabilität des Stoffsystems aufgrund eines Befalls mit Mikroorganismen. Dies könnte zukünftig durch Einsatz von zusätzlichen Komponenten unterbunden werden, die einen Bakterienbefall verhindern. In früheren Arbeiten wurde dies z.B. mit einer Zugabe von 200 ppm Natriumazid erreicht (Connemann et al., 1991). Auf die Zugabe von Natriumazid wurde hier verzichtet, da zu dem Zeitpunkt, als die Mikroorganismen gefunden wurden, bereits eine Vielzahl von Messergebnissen mit dem Stoffsystem vorlagen und eine systematische Veränderung des Absetzverhaltens durch die Zugabe zu befürchten war.

4 Ergebnisse aus Experiment und Modellierung

4.1 Heuristische Regeln

Die Anzahl der Einbautenarten und ihrer jeweiligen Varianten, die heute zur Verwendung in Flüssig-Flüssig-Abscheidern zur Verfügung stehen, ist sehr groß. Beispiele dafür sind Platten, Füllkörper, Gestricke, strukturierte Packungen und Wehre in jeweils verschiedenen Ausführungen und Materialien. Dabei sind nicht alle möglichen Einbauten für ein vorgegebenes Trennproblem gleich gut geeignet. Gelingt es nun zu einem frühen Zeitpunkt des Auslegungsprozesses, die Auswahl der Einbauten, die für das vorliegende Trennproblem in Frage kommen, sinnvoll einzugrenzen, kann der Auslegungsaufwand erheblich reduziert werden. Zur Eingrenzung für ein Trennproblem geeigneter Einbauten können heuristische Regeln angewendet werden. Diese werden stets nur im Hinblick auf eine konkrete Fragestellung formuliert, in diesem Fall für die Einbautenauswahl für Flüssig-Flüssig-Abscheider, und sind nicht als tatsächlich bzw. endgültig anzusehen. Die jeweilige Problemstellung wird in der Regel stark verallgemeinert, so dass die heuristischen Regeln nicht für alle möglichen Problemfälle Gültigkeit besitzen.

Die geläufigste Form der heuristischen Regeln sind die „Faustregeln“, die einen Umfang von einem oder einigen wenigen Sätzen haben. Weiterhin ist es möglich, die verschiedenen „Faustregeln“, die zu einer Fragestellung existieren, zu verknüpfen und grafisch darzustellen. Ein Beispiel dafür sind Entscheidungsbäume, bei denen ausgehend von der Problemstellung anhand einfacher Entscheidungskriterien die Auswahl möglicher Lösungen fortlaufend eingeschränkt wird, bis schlussendlich eine geeignete Lösung erreicht ist. Abb. 4-1 zeigt einen Entscheidungsbaum, mit dem man für die Trennung von Flüssig-Flüssig-Dispersionen entsprechend der Stoffdaten und Randbedingungen den geeigneten Trennapparat auswählen kann.

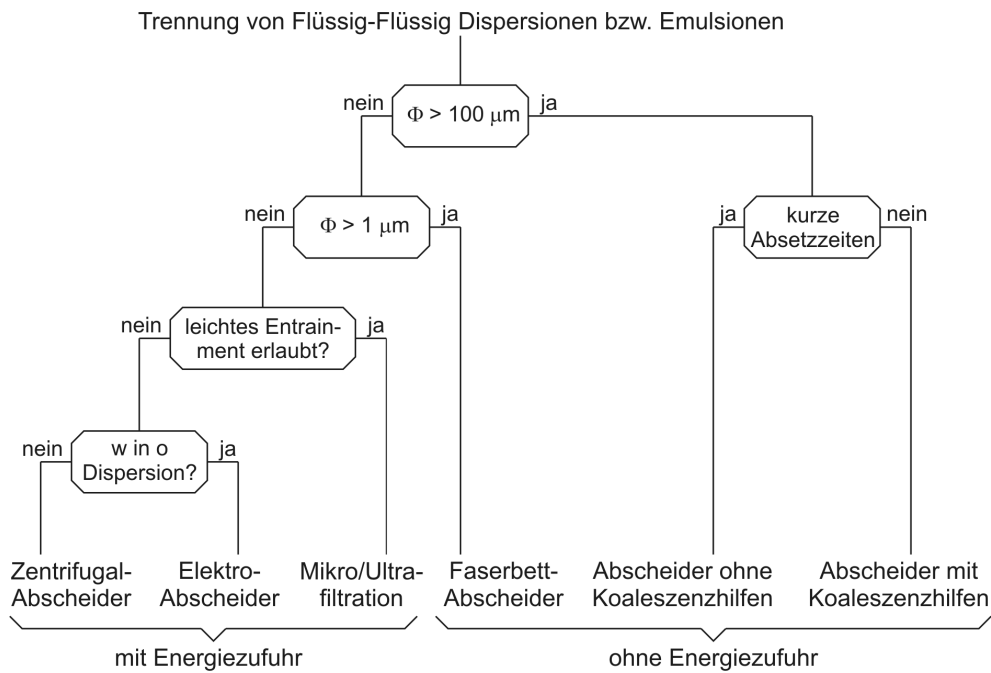


Abb. 4-1: Entscheidungsbaum zur Auswahl von Trennapparaten (Blaß, 1993)

In diesem Forschungsvorhaben wurde nun der Zweig des Entscheidungsbaumes genauer untersucht und weiterentwickelt, der zu den Abscheidern mit Koaleszenzhilfen weist. Dabei wurden die Untersuchungen auf den Bereich der Primär- oder Grobdispersionstrennung beschränkt. Einbauten zur Abtrennung von Sekundärdispersionen wie z. B. Faserbetten wurden hier nicht behandelt, sind aber bereits Thema intensiver Untersuchungen gewesen (Blaß, 1993, Bohnet, 1976).

Als Quellen, aus denen die zur Entwicklung der heuristischen Regeln benötigten Informationen gewonnen wurden, diente vor allen Dingen die bestehende Literatur und die Datenbasis aus eigenen und vorangegangenen experimentellen Arbeiten. Zudem wurden zwei Fragebögen entwickelt, die das Wissen und die Erfahrungen von Anwendern aus der Praxis auf dem Gebiet der Flüssig-Flüssig-Dispersionstrennung abfragen und in die Entwicklung der heuristischen Regeln einfließen lassen sollen (siehe Anhang 7.7). Aufgrund des geringen Rückflusses der Fragebögen konnten aus dieser Quelle keinen schlüssigen Erkenntnisse zur Entwicklung der heuristischen Regeln erhalten werden. In zukünftigen Untersuchungen sollte aber weiterhin versucht werden, anhand dieser oder ähnlicher Fragebögen Informationen zur Auslegung von Abscheidern mit Einbauten aus der Praxis zu gewinnen.

4.1.1 Auswahl der Einbauten

Die Kriterien der heuristischen Regeln zur Auswahl von Einbauten in der Literatur umfassen im wesentlichen Betriebsgrößen und Randbedingungen, die durch das jeweilige Trennproblem vorgegeben werden. Heuristische Regeln, die auf stoffspezifischen Daten basieren, sind nur in wenigen Fällen zu finden. Im folgenden werden die Entscheidungskriterien diskutiert, die in der Literatur zur Auswahl von Einbauten vorgeschlagen werden.

- **Feststoffe:** Enthält das zu trennende Stoffsystem Verunreinigungen in Form von Feststoffen, wird übereinstimmend der Einsatz von Platteneinbauten empfohlen. Während bei Einbauten wie Gestrieken und Füllkörpern eine Verschmutzung mit Feststoffen zu einem Verstopfen der meist feineren Einbautenstruktur führt, sorgt die Neigung der Platten im Plattenpaket für einen stetigen Abtransport der abgetrennten Feststoffpartikel und damit zu einer Selbstreinigung des Plattenpakets (Gerth, 2000, Heikamp 1995, Morrison, 1970). Für parallele Platten wird dabei ein Neigungswinkel von etwa 15° als optimaler Kompromiss zwischen Abscheideleistung und Verschmutzungsanfälligkeit angegeben (Blaß, 1993). In Füllkörpern und Gestrieken besteht dagegen die Tendenz, dass eine Mulmschicht in den Einbauten aufgestaut wird.
- **Tenside:** Sind Tenside oder andere grenzflächenaktive Substanzen in der Dispersion vorhanden, so wird ebenfalls wie bei Feststoffen von Füllkörpern und Gestrieken abgeraten. Platten bieten eine mögliche Alternative.
- **Druckverlust:** Soll bei einer Trennung ein möglichst geringer Druckverlust erzielt werden, so bieten sich wiederum Plattenpakete an. Füllkörper und Gestricke führen zu höheren Druckverlusten. Je größer die charakteristische Abmessung der Einbauten, desto geringer ist der Druckverlust. Desto kleiner ist aber auch der die Trennung unterstützende Effekt der Einbauten.
- **Kosten:** Aufgrund geringer Kosten werden insbesondere Füllkörper und Gestricke bevorzugt. Hier schneiden Plattenpakete schlechter ab.

Dies bedeutet insgesamt, dass für einfache Trennaufgaben ohne besondere Anforderungen Füllkörper oder Gestricke für eine Trennung geeignet sind, sollen dagegen

– was häufig auftritt – besondere Randbedingungen eingehalten werden oder sind Tensid- und Feststoffbelastungen nicht auszuschließen, so sind Platteneinbauten vorzuziehen.

Die Abmessungen der Einbauten richten sich ebenfalls einerseits nach den stofflichen Anforderungen. Je mehr mit Verunreinigungen zu rechnen ist, desto größer ist die charakteristische Abmessung der Einbauten zu wählen. Sollen dagegen sauberen Systeme getrennt werden und spielt der Druckverlust nicht die entscheidende Rolle, so können die Einbautenabmessungen gering gewählt werden, um so die Trenneffizienz zu maximieren.

4.1.2 Auswahl des Einbautenmaterials

Die Verbesserung Koaleszenz durch den Einsatz von Einbauten wird neben der Art und der Ausführung des gewählten Einbaus auch in hohem Maß durch die Wahl des Einbautenmaterials beeinflusst. Verschiedene Materialien werden unterschiedlich gut durch die jeweils disperse Phase benetzt und fördern damit unterschiedliche Koaleszenzmechanismen (Bohnet, 1976, Mumford 1972). Wird die Einbautenoberfläche durch die disperse Phase gut benetzt, so bildet sich ein Film auf der Oberfläche, in den weitere Tropfen hinein koaleszieren können. In diesem Fall wird also die Tropfen-Grenzflächen-Koaleszenz gefördert. Benetzt dagegen die disperse Phase die Einbautenoberfläche nicht oder nur schlecht, findet verstärkt Tropfen-Tropfen-Koaleszenz statt, da die Tropfen innerhalb der Einbauten in dichtem Kontakt bleiben.

In der Literatur herrscht weitestgehend Einigkeit darüber, dass der Mechanismus der Tropfen-Grenzflächen-Koaleszenz den größeren Einfluss auf die Dispersionstrennung hat und aus diesem Grund bevorzugt gefördert werden sollte (z. B. Berger, 1986, Hooper, 1979, Mumford, 1976, Rommel, 1990). Es wird deshalb empfohlen, ein Einbautenmaterial zu wählen, dass von der dispersen Phase gut benetzt wird. Im allgemeinen sind dies bei einer dispersen wässrigen Phase Metalle und bei einer dispersen organischen Phase Kunststoffe (z.B. PP, PTFE, PVDF oder Nylon). Bezüglich der Oberflächeneigenschaften wird eine raue und scharfkantige Oberfläche empfohlen (Bohnet, 1976, Müller, 1972), da dies ein Koaleszieren der Tropfen an der Einbautenoberfläche begünstigen soll. Eine Verbesserung der Benetzbarkeit kann

zudem durch ein zusätzliches Aufrauen der Oberfläche erreicht werden (Berger, 1986, Mumford, 1972).

Eigene und vorangegangene experimentelle Untersuchungen am Technikumsabscheider (Chatterjee, 1998, Schlieper, 2001) haben jedoch auch gezeigt, dass beim Einsatz von Einbauten mit Zwischenräumen in der Größenordnung der Tropfen (Platten mit $a \leq 10$ mm und Füllkörper DN 15) ein von der dispersen Phase schlecht benetzbares Einbautenmaterial gegenüber einem gut benetzbaren zu kürzeren Trennlängen führen kann. Dies wird darauf zurückgeführt, dass die Tropfen durch die verstärkte Tropfen-Tropfen-Koaleszenz sehr groß werden und die relativ kleinen Einbautenzwischenräume ausfüllen. Der dadurch erhöhte Strömungswiderstand durch das Plattenpaket führt zu einem steileren und damit kürzeren Dispersionskeil (Schlieper, 2001).

Für Gestrückpackungen wird unabhängig davon eine Kombination beider Materialarten (Metall und Kunststoff) empfohlen, da an den Knotenpunkten von Materialien mit unterschiedlich hohen Oberflächenenergien verstärkt Koaleszenz auftritt (Berger, 1986, Mumford, 1972).

Neben dem Einfluss des Einbautenmaterials auf die Trennwirksamkeit können weitere Kriterien für die Materialauswahl von Bedeutung sein. Das Material sollte gegenüber den zu trennenden Flüssigkeiten beständig, bei erhöhter Betriebstemperatur thermisch und mechanisch stabil und möglichst preiswert sein. Die Materialauswahl anhand dieser Kriterien steht häufig im Widerspruch zu der anhand der erforderlichen Benetzungseigenschaften, so dass in der Regel ein Kompromiss zwischen den verschiedenen Anforderungen gefunden werden muss.

4.2 Short-Cut-Methode

Von Schlieper (2001) wurde eine Auslegungsmethode vorgeschlagen, die eine Abschätzung der notwendigen Trennlänge im Abscheider schon auf Basis von einfachen Laborversuchen erlauben soll (Short-Cut-Methode). Dabei wird von einer direkten Proportionalität der bezogenen Absetzzeit im Absetzversuch und der bezogenen Trennlänge im Abscheider ausgegangen:

$$L_{E,bez} = \kappa t_{E,bez} \quad \text{mit} \quad \kappa = 1 \quad (4-1)$$

Mit dieser Annahme ist es möglich, auf Basis von Absetzversuchen ohne und mit Einbauten sowie der Ermittlung der Trennlänge im Abscheider ohne Einbauten, z. B. durch Berechnung mit dem Modell nach Henschke (1995), die Trennlänge im Abscheider mit Einbauten abzuschätzen. Die Vorstellung, die zu diesem Ansatz führt, ist in Abb. 4-2 skizziert. Ausgegangen wird von dem Absetzversuch, bei dem als Funktion der fortschreitenden Zeit die dichtgepackte Tropfenschicht abgebaut wird. In dem Abscheider kann man sich die Vorgänge nun so vorstellen, als würde der Absetzversuch mit durch den Abscheider strömenden Phasen mitbewegt, so dass die Zeitskala im Absetzversuch direkt der Ortsskala im Abscheider entspricht.

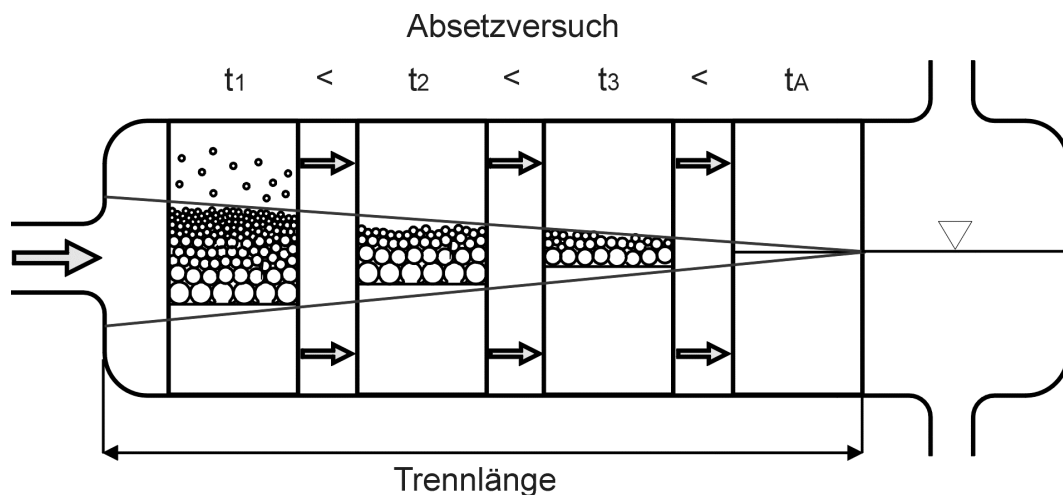


Abb. 4-2: Vorstellung für Short-Cut-Methode

Diese Vorstellung setzt ein Blockprofil in der gesamten mehrphasigen Strömung voraus. Dies ist sicher nicht gewährleistet. Einerseits muss im Bereich der homogenen Phasen die Haftbedingung an den Abscheiderwänden gelten. Zum anderen ist die Viskosität des Dispersionskeils, der aus einer dritten Phase bestehend betrachtet werden kann, i.d.R. höher als die Viskositäten der homogenen Phasen. Lediglich bei Gemischen, bei denen eine Phase wesentlich viskoser ist als die andere, trifft diese Aussage nicht zwingend zu. Wandhaftung bewirkt eine schnellere Strömung der Dispersion im Vergleich zu den homogenen Phasen. Zudem kann der Dispersionskeil auch durch den Abscheider ‚hindurchschießen‘ oder relativ zu den homogenen Phasen hindurchgedrückt werden, wenn bei hoher Dispersionsviskosität der Anfangsimpuls nicht sorgfältig abgebaut wurde und keine Wechselwirkung mit Einbauten auftritt, z.B. im leeren Abscheider oder bei Platteneinbauten mit großem Plattenabstand.

Die höhere Viskosität der Dispersion wird allerdings bei Einbauten dazu führen, dass die Dispersion intensiv mit den Einbauten wechselwirkt und relativ verzögert wird.

Beim System n-Butanol + Wasser fand Schlieper für die Short-Cut-Methode Abweichungen zu der gemessenen Trennlänge im Abscheider mit Einbauten von unter 20 %. Die Ergebnisse für das System Tridecanol + Wasser fielen deutlich schlechter aus (Schlieper, 2001). Hierbei ist anzumerken, dass Schlieper für seine Untersuchungen einen Absetzversuch mit Einbauten verwendet hat, der an der Zapfstelle der Abscheideranlage durchgeführt wurde. Wie bereits in 3.4.2 erwähnt wurde, können während der Durchführung dieses Versuchs Volumenstrom und Phasenverhältnis in der Abscheideranlage nicht exakt eingestellt werden. Für die durchgeführten Versuche kann also nicht von einer reproduzierbaren und damit vergleichbaren Dispersionserzeugung im statischen Mischer der Abscheideranlage ausgegangen werden. Dies erklärt möglicherweise die großen Abweichungen der mit der Short-Cut-Methode von Schlieper abgeschätzten Trennlängen zu den im Abscheider gemessenen Trennlängen. Mit dem in 3.3 vorgestellten Absetzversuch in der Rührzelle mit Einbauten steht ein neuer Laborversuch zur Verfügung, der im Gegensatz zum Absetzversuch an der Zapfstelle des Abscheiders über eine reproduzierbare Tropfenerzeugung verfügt und in dem verschiedene Formen von Einbauten untersucht werden können. Mit Hilfe dieses neuen Absetzversuchs wurde die von Schlieper entwickelte Short-Cut-Methode erneut untersucht. Dazu wurden in der Rührzelle Absetzversuche ohne und mit Einbauten durchgeführt und jeweils die bezogene Absetzzeit ermittelt. Diese wurde dann mit der gemessenen bezogenen Trennlänge der zugehörigen Versuche im Abscheider verglichen.

Im folgenden werden die Ergebnisse der vergleichenden Abscheider- und Absetzversuche mit verschiedenen Stoffsystemen und Verteilerlochblechen diskutiert. Für jede Versuchsreihe sind mehrere Messwerte aufgetragen, die mit den in der Versuchsreihe untersuchten Phasenverhältnissen ermittelt wurden. Die bezogene Absetzzeit wurde dabei jeweils über mindestens drei vergleichende Absetzversuche ohne und mit Einbauten gemittelt. Die bezogene Trennlänge ist jeweils der Mittelwert der bezogenen Trennlängen aus Versuchen mit verschiedenen Volumenströmen. Für alle Versuche sind die mittleren relativen Abweichungen von den Mittelwerten der bezogenen Absetzzeit und der bezogenen Trennlänge als Fehlerbalken dargestellt.

Für n-Butanol + Wasser wurden Versuche mit beiden Geometrien der Verteilerlochbleche ausgewertet (siehe Abb. 4-3 und Abb. 4-4). In beiden Fällen liegen nahezu alle Messwerte in einem Intervall von $\pm 20\%$ um den angenommenen funktionalen Zusammenhang. Eine charakteristische Verteilung der Messwerte innerhalb einer Versuchsreihe, also in Abhängigkeit von Volumenstrom und Phasenverhältnis, oder zwischen verschiedenen Versuchsreihen konnte nicht festgestellt werden. Die bezogenen Trennlängen werden in allen Fällen in gleichem Maß zu hoch als auch zu niedrig vorhergesagt. Die Short-Cut-Methode liefert für das System n-Butanol + Wasser unabhängig von Plattenabstand, Plattenmaterial und Geometrie des Verteilerlochblechs gute Ergebnisse.

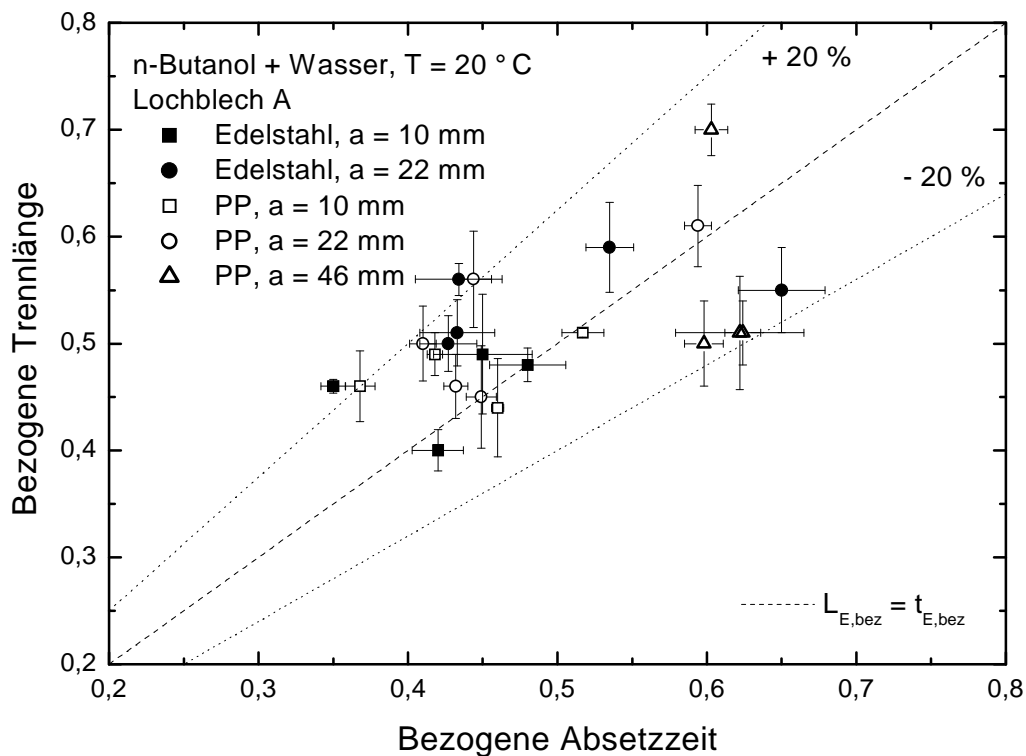


Abb. 4-3: Short-Cut-Methode mit n-Butanol + Wasser und Lochblech A

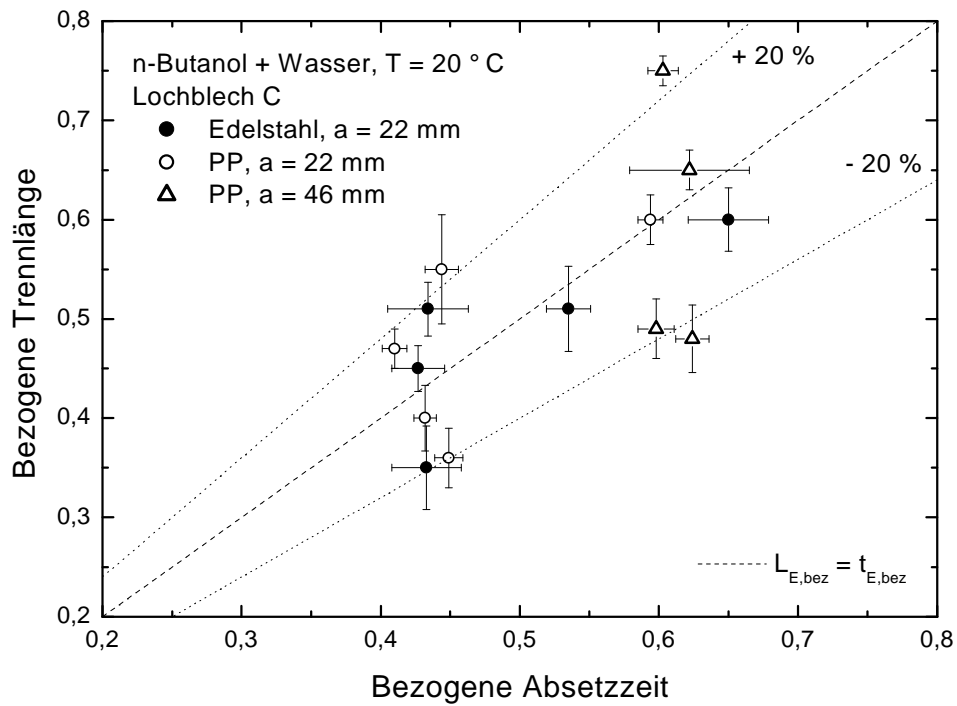


Abb. 4-4: Short-Cut-Methode mit n-Butanol + Wasser und Lochblech C

In Abb. 4-5 sind Versuche mit dem System n-Butanol + Wasser + NaCl unter Verwendung verschiedener Platten und Füllkörper aufgetragen.

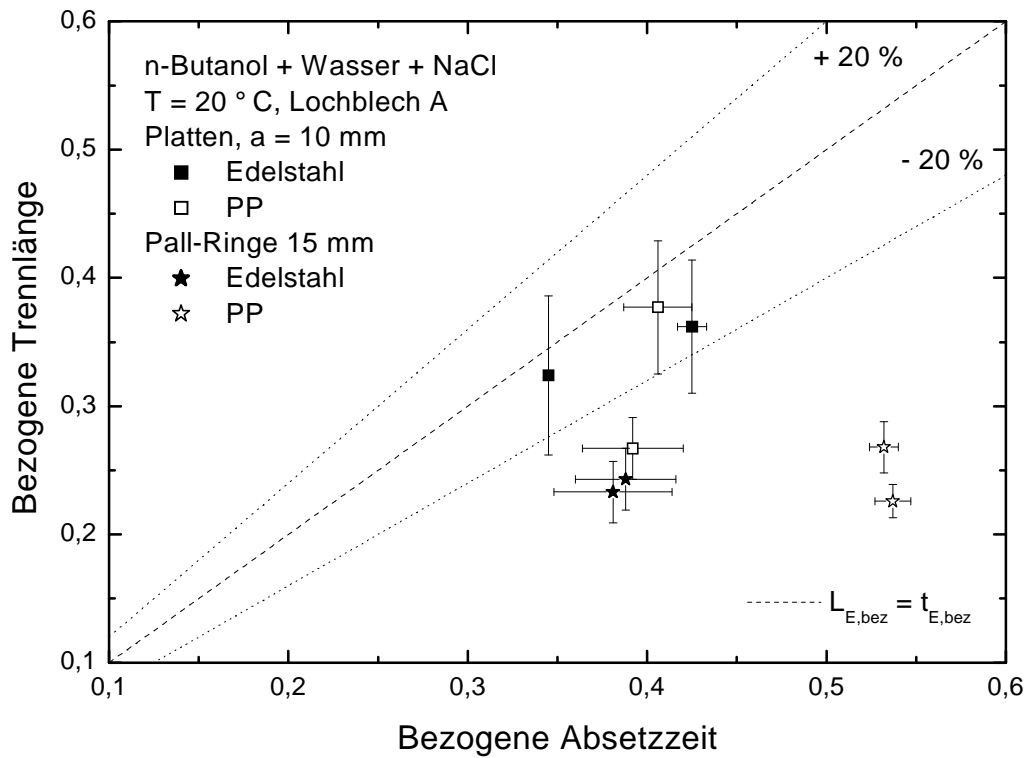


Abb. 4-5: Short-Cut-Methode mit n-Butanol + Wasser + NaCl

Die Messwerte für Platten liegen auch hier überwiegend in einem Intervall von $\pm 20\%$ um den angenommenen funktionalen Zusammenhang. Ein merklicher Einfluss des Plattenmaterials ist nicht feststellbar. Selbst für das hochviskose Tridecanol hatte Schlieper (2001) etwa $\kappa = 1$ gefunden, auch wenn die Schwankungen hier etwas ausgeprägter waren. Hier ist allerdings zu berücksichtigen, dass bei hochviskosen Systemen die Grenzen der Short-Cut-Methode erreicht sind. Dies wird an Abb. 3-27 deutlich, bei der für Tridecanol eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Belastung festgestellt wird. Diese Abhängigkeit ist allerdings sicher zum Teil auch auf die unterschiedliche Durchströmung des statischen Mischers und das daher unterschiedliche erzeugte Tropfenspektrum zurückzuführen. Die Short-Cut-Methode setzt hier ja in Absetzversuch und Abscheider ein identisches Spektrum voraus. Um diese Abhängigkeiten für das Tridecanol-System weiter untersuchen zu können, wäre einerseits eine befriedigende Lösung für das Mulm-Problem mit diesem System erforderlich gewesen, außerdem war durch die häufigen Stoffsystemwechsel bei diesem System die ursprünglich eingesetzte Charge aufgebraucht, so dass die korrespondierenden Absetzversuche nicht mehr durchgeführt werden konnten.

Für die Versuche mit Füllkörpern zeigt sich nun, dass hier die bezogene Trennlänge stets geringer ist als von der Short-Cut-Methode vorhergesagt. Die Dispersionstrennung in einer Füllkörperpackung wird also im Abscheiderversuch deutlicher verbessert als im Absetzversuch. Es liegt die Vermutung nahe, dass ein zusätzlicher Effekt die verbesserte Dispersionstrennung im Abscheider bewirkt, der auf der Durchströmung der jeweiligen Einbauten im Abscheider beruht und deshalb durch den Absetzversuch nicht erfasst werden kann.

Eine mögliche Erklärung dafür lässt sich finden, wenn man die Höhe des Dispersionskeils nach dem Verteilerlochblech im Abscheider ohne und mit verschiedenen Einbauten vergleicht (siehe Abb. 4-6).

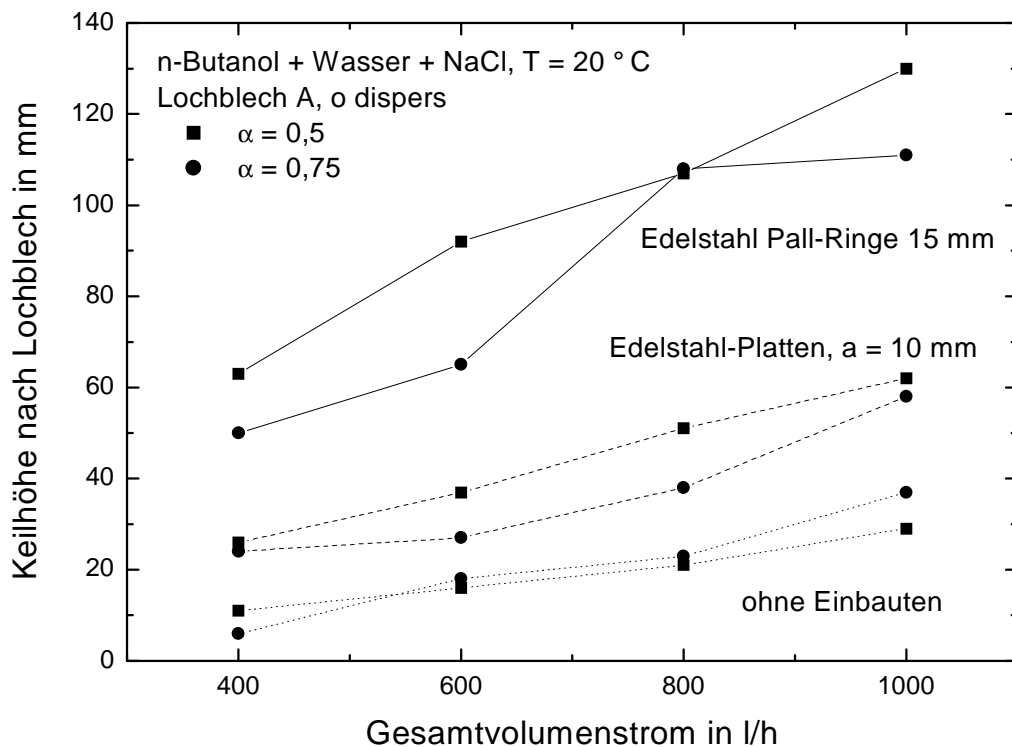


Abb. 4-6: Keilhöhen nach dem Verteilerlochblech im Abscheider ohne und mit Einbauten

Im Abscheider ohne Einbauten beträgt die anfängliche Höhe des Dispersionskeils in Abhängigkeit vom Volumenstrom zwischen 5 mm und maximal 40 mm. Es finden sich hier also relativ flache und langgestreckte Dispersionskeile. Bei Verwendung von Platten steigt die anfängliche Keilhöhe schon auf 25 mm bis 60 mm an. Im Abscheider mit Füllkörpern werden sogar anfängliche Keilhöhen von 50 mm bis 130 mm erreicht. Die Keilhöhen sind gegenüber dem Abscheider ohne Einbauten um den Faktor 4-10 erhöht. Bei Verwendung von Einbauten bilden sich also mächtige und dementsprechend kurze Dispersionskeile.

Die Einbauten setzen den strömenden kohärenten Phasen und der strömenden Dispersion einen Widerstand entgegen, der die Strömungsgeschwindigkeiten herabsetzt. Die Viskosität der Dispersion ist in der Regel höher als die der kohärenten Phasen, so dass die Strömung der Dispersion am stärksten verzögert wird. Die Dispersion staut sich also auf und bildet einen Keil, der gegenüber dem Keil im Abscheider ohne Einbauten eine größere anfängliche Keilhöhe und eine geringere Keillänge aufweist. Die Verkürzung der Keillänge, die durch das Aufstauen der Dispersi-

on entsteht, überlagert die im Absetzversuch beobachtete Verbesserung der Dispersionsstrennung.

Füllkörper stauen dabei den Dispersionskeil höher auf als Platten und bewirken dementsprechend kürzere Dispersionskeile. Dieses stärkere Aufstauen des Dispersionskeils kann für Füllkörper durch einen geänderten funktionalen Zusammenhang zwischen bezogener Trennlänge und bezogener Absetzzeit berücksichtigt werden. Da für Platten $\kappa = 1$ gute Ergebnisse liefert und Füllkörper die anfängliche Keilhöhe gegenüber Platten zusätzlich um den Faktor 2 erhöht, wird hier vereinfachend davon ausgegangen, dass die Trennlänge zusätzlich um den Faktor 2 verkürzt wird. Mit dieser Annahme ergibt sich ein Proportionalitätsfaktor von $\kappa = 0,5$.

Wird nun die Short-Cut-Methode mit $\kappa = 0,5$ auf die Versuche mit Füllkörpern angewendet (siehe Abb. 4-7), so liegen auch hier nahezu alle Messwerte in einem Intervall von $\pm 20\%$ um den gewählten funktionalen Zusammenhang.

Um die stoffliche Basis für die Short-Cut-Methode zu erhöhen, wurden für einen Zustand Absetzversuche mit dem Toluol-System und Pall-Ringen aus Edelstahl durchgeführt. Diese Messungen ergaben Absetzzeiten, die bei 2,5 s bis 3 s lagen. Diese Zeiten sind damit extrem kurz und mit einer entsprechenden Unsicherheit behaftet. Insbesondere wurde beobachtet, dass nach maximal 1,5 Sekunden die wesentliche Koaleszenz bereits abgeschlossen ist und danach lediglich ein Strömen der homogenen Phasen in großen Strähnen hin zur Hauptphasengrenze stattfindet. So ergibt sich für den eigentlichen Koaleszenzvorgang eine bezogene Absetzzeit von maximal 0,06 was etwa der reduzierten Abscheiderlänge entspricht. Bei aller Unsicherheit dieser Toluol-Messungen aufgrund der extrem schnellen Vorgänge zeigen diese Ergebnisse aber nochmals, dass mit der Short-Cut-Methode eine konservative Abschätzung mit $\kappa = 1$ gelingt.

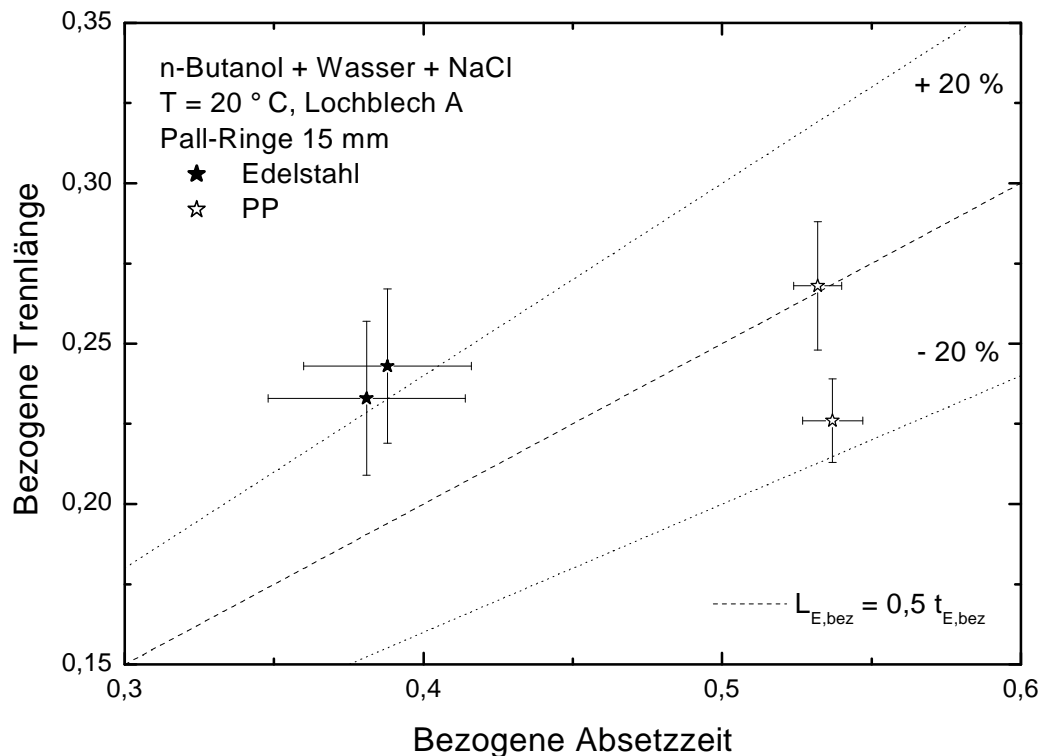


Abb. 4-7: Short-Cut-Methode für Füllkörper mit $\kappa = 0,5$ und n-Butanol + Wasser + NaCl

Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass mit der Short-Cut-Methode unter Verwendung des neu entwickelten Absetzversuchs in der Rührzelle mit Einbauten eine Auslegungsmethode zur Verfügung steht, mit der die bezogene Trennlänge für Abscheider mit Einbauten bei einer Genauigkeit von $\pm 25\%$ vorhergesagt werden kann. Es sei nochmals betont, dass mit $\kappa = 1$ immer eine konservative Abschätzung der benötigten Abscheiderlänge vorgenommen werden kann. Die Ergebnisse der Short-Cut-Methode lassen zudem die Vermutung zu, dass zwischen dem Proportionalitätsfaktor κ und dem Aufstauen des Dispersionskeils durch die jeweiligen Einbauten ein Zusammenhang besteht. Die Änderung der anfänglichen Keilhöhe durch die Einbauten kann aber bisher nur aus Technikumsversuchen bestimmt werden. Das Aufstauen des Dispersionskeils wird dabei im wesentlichen durch den Widerstand bestimmt, den die Einbauten der strömenden Dispersion entgegensetzen, also durch den Druckverlust der Einbauten. Dies bedeutet auch, dass κ voraussichtlich um so kleiner ist, je kleiner die charakteristische Abmessung der Einbauten gewählt wird.

Hier zeigt sich nun auch ein wesentlicher Fortschritt und Erkenntnisgewinn der vorliegenden Arbeit. Während bei früheren Arbeiten zwar bereits die Dispersion als un-

abhängige dritte Phase modelliert wurde, die mit entsprechenden Ansätzen prinzipiell modelliert werden kann (Henschke, 1995), wird nun deutlich, dass der Modellierung der Wechselwirkung zwischen Einbauten und Dispersionskeil eine besondere Bedeutung zukommt. Der für die untersuchten Füllkörper erhaltene Wert von $\kappa = 0,5$ zeigt, dass die Dispersionsströmung detailliert beschrieben werden muss, wenn die Gleichgewichte im Abscheider korrekt abgebildet werden sollen und so das Aufstauen des Dispersionskeiles sich aus einer Modellierung ergibt. Hier hat Henschke (1995) zwar eine Reihe von Ansätzen zur Beschreibung der Dispersionsviskosität verglichen und einen für sein Modell verwendet, allerdings wird dabei die Wechselwirkung mit den Einbauten nicht berücksichtigt. Hier besteht nun anscheinend noch wesentlicher Forschungsbedarf, da aus der Literatur kein Ansatz hierfür bekannt ist.

Weitere Untersuchungen sollten daher das Ziel haben, das Aufstauen des Dispersionskeils im Einbautenbereich anhand von Druckverlustmodellen für die verschiedenen Einbauten zu modellieren. Dadurch wäre es möglich, den Proportionalitätsfaktor κ ohne eine vorherige Durchführung von Technikumsversuchen zu berechnen oder zumindest abzuschätzen und so die Short-Cut-Methode nur auf Laborversuchen, in diesem Fall Absetzversuche ohne und mit Einbauten, zu stützen. Zusätzliche vergleichende Abscheider- und Absetzversuche ohne und mit Einbauten mit weiteren Stoffsystemen erlauben zudem, die Gültigkeit der Short-Cut-Methode für ein breiteres Spektrum an Stoffdaten, z. B. für hohe Viskositäten, zu überprüfen.

4.3 Detailliertes Modell

Bevor auf die einzelnen Aspekte detaillierter Modellierung im Detail eingegangen wird, soll eine allgemeine Betrachtung vorangestellt werden. Prinzipiell können sowohl der Absetzversuch als auch der Abscheider modelliert werden. Beim Abscheider ohne Einbauten gelang es Henschke (1995), beide Modelle zu verknüpfen. Bei der Modellierung von Abscheidern mit Einbauten kommt allerdings die Wechselwirkung insbesondere des Dispersionskeils mit den Einbauten hinzu, der z.B. bei Füllkörpern sehr ausgeprägt ist. Um den Einfluss dieser Wechselwirkung zu diskutieren, sei wieder das in Abschnitt 4.2 vorgestellte Konzept betrachtet, dass der Abscheider aufgefasst werden kann als ein Absetzversuch, der mit mittlerer Strömungsgeschwindigkeit durch den Abscheider hindurchgeschoben wird. Hier wird deutlich, dass die intensive Wechselwirkung des Dispersionskeils mit den Einbauten eine sehr

deutliche Verzögerung der Dispersion bewirken wird. Dies ist wie bereits diskutiert z.B. daran zu erkennen, dass für Füllkörper ein Wert von etwa $\kappa = 0,5$ gefunden wurde. Wenn dieser Effekt im Detail modelliert werden soll, muss die Verzögerung der Dispersion in den Einbauten quantitativ erfasst werden. Hierzu ist es zwingend notwendig, dass zunächst die Viskosität der dichtgepackten Dispersion beschrieben werden kann, deren Einfluss auf die Durchströmung der Einbauten anschließend angegeben werden muss. Aus der Literatur ist allerdings kein Ansatz bekannt, mit dem Dispersionsviskositäten genau abgeschätzt und mit dem die Dispersions-Durchströmung von komplexeren Geometrien beschrieben werden kann. Daher stellt sich die prinzipielle Frage, wie aussichtsreich eine detaillierte Modellierung der Abscheider ist.

Da bei den Absetzversuchen die Wechselwirkung der dichtgepackten Dispersion mit den Einbauten wesentlich geringer ist als beim Abscheider, ist es aussichtsreicher, den Absetzversuch zu modellieren als den Abscheider. Der praktische Fortschritt dabei ist begrenzt, da der Parameter für die Koaleszenz aus einem realen Absetzversuch ermittelt werden muss, ein Versuch mit originalem Stoffsystem muss also in jedem Fall durchgeführt werden. Eine Übertragung auf Abscheider kann dann zunächst mit $\kappa = 1$ erfolgen, wobei davon auszugehen ist, dass bei sorgfältigem Impulsabbau im Abscheider dies eine konservative Abschätzung darstellt. Hierzu wird lediglich das Auslegungsmodell nach Henschke sowie der in dieser Arbeit entwickelte modifizierte Absetzversuch mit dem originalen Stoffsystem benötigt. Ein wesentlicher Fortschritt gegenüber dieser Short-Cut-Abschätzung ist nun nach dem zuvor diskutierten durch eine detailliertere Modellierung des Abscheiders mit Einbauten nicht zu erwarten, da die Wechselwirkung der dichtgepackten Dispersion mit den Einbauten heute noch nicht angemessen beschrieben werden kann.

Dennoch sollen hier Modellerweiterungen und detaillierte Modellierungen zumindest des Absetzversuches vorgestellt werden, da aus diesen Modellierungen Einsichten über das Wechselspiel unterschiedlicher prinzipieller Phänomene beim Abscheiden von Dispersionen in unterschiedlichen Geometrien gewonnen werden können, die zum Gesamtverständnis beitragen. Dieses Gesamtverständnis kann dann den Grundstein für weitere Entwicklungen auf dem Gebiet sowohl der Abscheidertechnik als auch ihrer Modellierung sein. Entsprechend werden hier zunächst Weiterentwick-

lungen an der Auswertung des Absetzversuches nach Henschke vorgestellt und anschließend Ergebnisse zur detaillierten Modellierung der Absetzversuche mit unterschiedlichen Einbauten.

4.3.1 Modellerweiterungen

Bei der Modellierung des Absetzversuchs ohne Einbauten wurden von Henschke (1995) verschiedene Annahmen und Vereinfachungen gemacht, um die Komplexität des Modells in einem sinnvollen Rahmen zu halten. Eine Annahme war dabei, dass sich die Tropfen nach Beendigung des Rührvorgangs unter Vernachlässigung einer Beschleunigungsphase sofort mit ihrer stationären Sedimentationsgeschwindigkeit v_S bewegen. Dies bringt mit sich, dass die Sedimentationskurve als Ursprungsgerade mit der Steigung v_S beginnt.

Betrachtet man sich nun experimentell ermittelte Absetzkurven, so stellt man fest, dass die Sedimentationskurve in nahezu keinem Versuch mit einer konstanten Steigung beginnt, sondern in den ersten Sekunden flacher verläuft und erst später eine konstante Steigung annimmt. Diese Verzögerung wird auf einen Anstieg der Sauterdurchmessers der Tropfen im sich abbauenden Turbulenzfeld des Rührers und damit einer Zunahme der Sedimentationsgeschwindigkeit in den ersten Sekunden des Versuchs zurückgeführt. Dieser Umstand führt zu zum Teil deutlichen Abweichungen der gemessenen und berechneten Sedimentationskurven.

Um die gemessenen Sedimentationskurven noch genauer abbilden zu können, wurde im Modell nun eine Zeitspanne als Verzögerung eingeführt, im folgenden Totzeit t_{tot} genannt. Die Sedimentationskurve beginnt erst für $t > t_{\text{tot}}$ mit ihrer konstanten Steigung in Höhe der Sedimentationsgeschwindigkeit v_S . Für $t < t_{\text{tot}}$ wird die Sedimentationsgeschwindigkeit vereinfachend mit $v_S = 0$ festgelegt.

Die Totzeit wird gleichzeitig mit der Sedimentationsgeschwindigkeit der Tropfen aus der gemessenen Sedimentationskurve bestimmt. Dazu wird eine Regressionsgerade der n Messpunkte (t_i, h_i) im linearen Bereich der Sedimentationskurve berechnet:

$$h = a_0 + a_1 \cdot t \quad (4-2)$$

mit:

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum t_i \quad , \quad (4-3)$$

$$\bar{h} = \frac{1}{n} \sum h_i \quad , \quad (4-4)$$

$$a_1 = \frac{\sum t_i h_i - n \bar{t} \bar{h}}{\sum t_i^2 - n \bar{t}^2} = v_S \quad (4-5)$$

und

$$a_0 = \bar{h} - a_1 \bar{t} \quad (4-6)$$

Die Größe a_1 , also die Steigung der Regressionsgeraden, entspricht der Sedimentationsgeschwindigkeit v_S der Tropfen. Die Bestimmung der Sedimentationsgeschwindigkeit erfolgt in dieser Form unverändert zum Modell nach Henschke. Die Totzeit t_{tot} kann nun zusätzlich sehr einfach als Schnittpunkt der Regressionsgerade mit der Zeitachse bestimmt werden:

$$t_{\text{tot}} = \bar{t} - \frac{\bar{h}}{a_1} \quad . \quad (4-7)$$

In Abb. 4-8 werden beispielhaft Absatzkurven verglichen, die ohne und mit Totzeit berechnet wurden. Es ist deutlich zu erkennen, dass unter Verwendung der Totzeit der Verlauf der Sedimentationskurve für die gesamten Versuchsdauer sehr gut beschrieben werden kann. Hierbei muss noch einmal betont werden, dass sowohl mit als auch ohne Verwendung der Totzeit die gleiche Sedimentationsgeschwindigkeit und damit derselbe anfängliche Sauterdurchmesser der Tropfen berechnet und verwendet wird. Die Verwendung der Totzeit bewirkt lediglich eine Verschiebung des linearen Teils der Sedimentationskurve zu größeren Zeiten t . Dies zeigt jedoch auch Auswirkungen auf den berechneten Verlauf der Koaleszenzkurve. Die für das Modell nach Henschke charakteristische Abweichung der berechneten von der gemessenen Koaleszenzkurve, bei dem zu Versuchsbeginn ein etwas zu niedriger und am Versuchsende ein etwas zu hoher Verlauf der Koaleszenzkurve berechnet wird, ist nun weniger stark ausgeprägt. Dies bewirkt auch eine geringere Differenz zwischen berechneter und gemessener Absetzzeit. Durch die Verwendung der Totzeit werden also die Verläufe der Sedimentations- und auch der Koaleszenzkurve mit einer größeren Genauigkeit beschrieben.

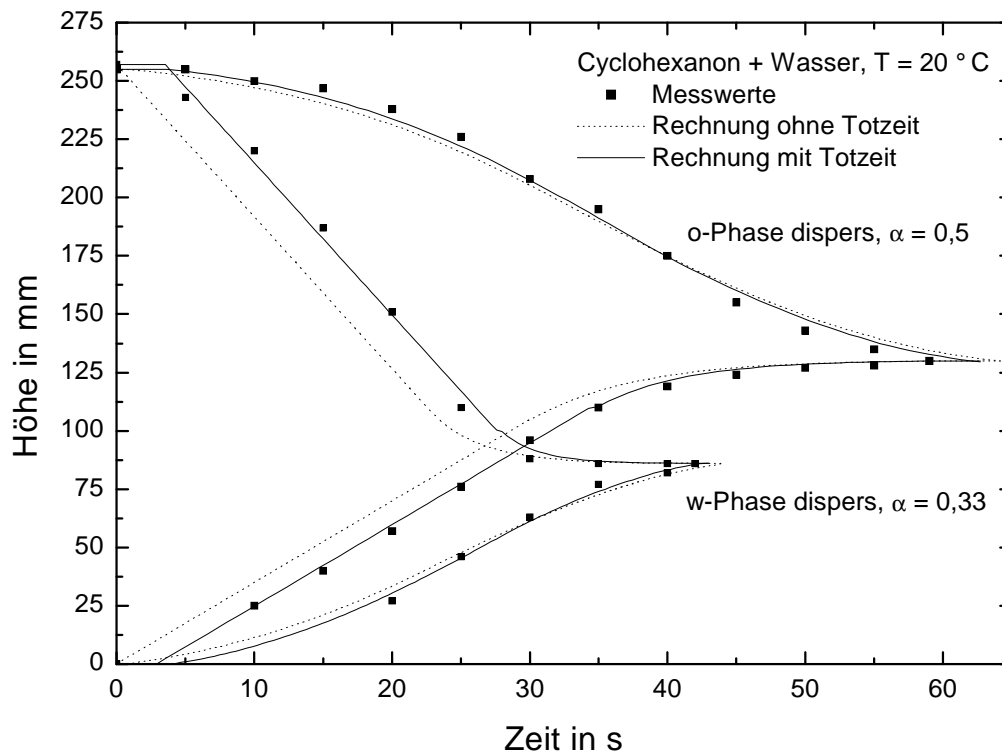


Abb. 4-8: Berechnung von Absetzversuchen mit und ohne Totzeit

4.3.2 Dispersionstrennung mit Platteneinbauten

Um zunächst eine vergleichbare Auswertung der Versuche mit Platteneinbauten zu ermöglichen wie beim Absetzversuch ohne Einbauten, wurden in einem ersten Versuch die über alle Platten akkumulierten Höhen ausgewertet. Es wurden also z.B. die Höhen aller dichtgepackten Dispersionsschichten in den einzelnen Compartments des Absetzversuches zwischen jeweils zwei Platten vermessen (siehe Abb. 3-14) und zusammenaddiert. Anschließend wurde versucht, durch Einführung einer zusätzlichen Platteneffektivität in die Auswertung nach Henschke (1995) diese Versuche zu beschreiben. Es zeigte sich schnell, dass dieser Ansatz zu einfach ist und die Versuche nicht sinnvoll abbilden kann.

Um die detaillierten Mechanismen aufzuklären, die beim Absetzversuch mit Platteneinbauten auftreten, wurde daher anschließend der Absetzversuch mit nur einer einzigen Platte als Modelleinbau untersucht (vgl. Abb. 3-16). Das Absetzverhalten wurde mit Video ausgewertet. Genaue Betrachtung erlaubte Rückschlüsse auf die detaillierten Vorgänge an der Platte. So zeigte sich beispielsweise, dass praktisch stets nur dichtgepackte Dispersion und eine der homogenen Phasen in den Compart-

ments zu erkennen ist. Einzige Ausnahme hiervon ist das Compartment, in dem die Hauptphasengrenze liegt. Dies bedeutet, dass zwischen den Compartments ein direkter Austausch von homogener Phase stattfinden muss.

Die Bilanzen sollen an einem Beispiel erläutert werden. Es sei dazu angenommen, dass der Absetzbehälter eine Platte enthalte und die leichte Phase die disperse sei, d.h. die Tropfen von unten nach oben aufsteigen. Die Hauptphasengrenze liege im oberen Compartment, was für diesen Fall die typische Situation ist. Wird das gesamte Gefäß beim Start mit Dispersion beaufschlagt, findet in beiden Compartments Sedimentation und Koaleszenz statt. Würden beide Compartments nicht mit einander verbunden sein, so würde sich in beiden Compartments eine Hauptphasengrenze ausbilden, zu der hin die Sedimentation stattfindet. Aufgrund der Beobachtung, dass in diesem Fall sich im unteren Compartment keine Schicht homogener leichte Phase ausbildet, bedeutet, dass diese durch Koaleszenz der Tropfen im unteren Compartment entstehende Phase vollständig ins obere Compartment übertragen wird. Es kann davon ausgegangen werden, dass dies in Form von Flüssigkeitsstrahlen bzw. so großer Tropfen geschieht, dass deren Koaleszenz im oberen Compartment unberücksichtigt bleiben kann. Auf Grund der Volumenkonstanz muss der Transfer der homogenen leichten Phase vom unteren in das obere Compartment durch einen entgegengesetzten Strom kompensiert werden. Dieser Strom kann entweder aus homogener schwerer Phase aus dem oberen Compartment bestehen oder – falls dies zur Kompensation nicht ausreicht – aus unkoaleszierter Dispersion.

Diese Vorgänge können nun direkt mit der Modellierung nach Henschke (1995) gekoppelt werden. Sedimentation und Koaleszenz werden also wie von Henschke beschrieben, hinzu tritt lediglich eine programmtechnisch durchaus aufwändige Buchhaltung, welche der Phasen bzw. Dispersionen zwischen den Compartments transferiert wird. Dabei sind alle möglichen Austauschrichtungen zu berücksichtigen. In jedem Compartment wird dazu für einen Zeitschritt Sedimentation und Koaleszenz nach Henschke berechnet. Anschließend wird geschaut, wie viel homogene leichte Phase im unteren Compartment bzw. homogene schwere Phase im oberen Compartment entstanden ist. Die jeweils größere dieser Mengen bestimmt den Transfer zwischen den Compartments. Die Differenz der Mengen wird mit einer entsprechenden Menge Dispersion ausgeglichen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass ent-

weder dichtgepackte Dispersion oder noch nicht dicht gepackte Dispersion für den Transfer herangezogen wird, je nachdem, welche Schicht für den Transfer in Betracht kommt. Transferierte Dispersion wird direkt der entsprechenden Dispersionszone in dem Compartment zugeschlagen, in das sie transferiert wurde.

Die Platte wird wie bei Chatterjee (1998) berücksichtigt, indem ihr eine gewisse Trenneffizienz ρ_{eff} gegenüber der freien Phasengrenze zugewiesen wird. Diese Effizienz wird über die Koaleszenzzeit zwischen Tropfen und Grenzfläche τ_{TGK} eingeführt, die ein Maß für die charakteristische Zeit zur Koaleszenz zwischen Tropfen und Grenzfläche ist. Wie bei Chatterjee lässt sich so schreiben:

$$\tau_{\text{TGK,PL}} = \frac{\nu_{\text{TGK}}}{\rho_{\text{eff}}},$$

wobei der Index PL den durch die Platte beeinflussten Wert indiziert.

Ein Beispiel für eine Modellierung ist in Abb 4-9 gezeigt. Hierbei wurden der Sauter-durchmesser sowie der Koaleszenzparameter aus dem Absetzversuch ohne Einbauten übernommen. ρ_{eff} wurde von Hand variiert, wobei sich bereits bei $\rho_{\text{eff}} = 1$ sehr brauchbare Ergebnisse (vgl. Abb. 4-9) ergaben. Es zeigt sich, dass mit dem beschriebenen Algorithmus das Verhalten an einer Platte in guter Näherung vorausgesagt werden kann.

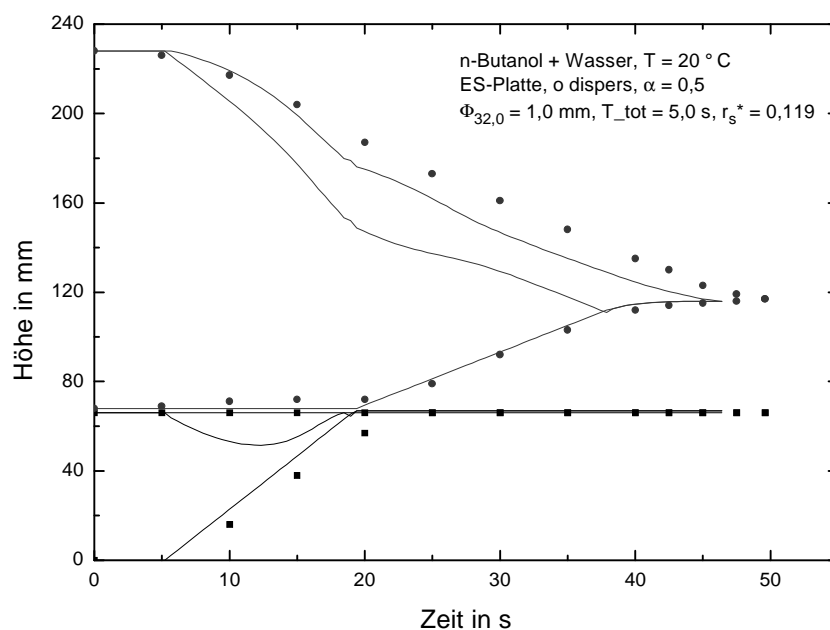


Abb. 4-9: Detaillierte Modellierung eines Absetzversuchs mit einer Platte

4.3.3 Dispersionstrennung mit Füllkörperpackungen

Die Modellierung der Dispersionstrennung in einer Füllkörperpackung, zunächst für einen Absetzversuch, erfolgt auf Basis des Modells nach Henschke. Die Grundlage bildet hier zunächst ein Absetzversuch ohne Einbauten, mit dem der anfängliche Sauterdurchmesser der Tropfen, die Totzeit und der Asymmetrieparameter bestimmt werden. Für diese Größen wird angenommen, dass sie nur vom Stoffsystem und der verwendeten Dispersionserzeugung abhängig sind und damit als Anfangsgrößen für einen nachfolgenden Absetzversuch mit Füllkörpern in der Rührzelle als unverändert angenommen werden können.

Durch die Anwesenheit der Füllkörper werden sowohl Sedimentation als auch Koaleszenz beim Absetzversuch beeinflusst. In Abb. 3-15 ist zunächst zu erkennen, dass die Steigung der Sedimentationskurve beim Absetzversuch mit Füllkörpern deutlich größer ist als beim Absetzversuch ohne Einbauten. Da die Sedimentation von Einzeltröpfchen durch Füllkörper eigentlich behindert wird, lässt sich die größere Steigung der Sedimentationskurve und damit höhere Sedimentationsgeschwindigkeit der Tropfen nur durch eine Zunahme des Tropfendurchmessers erklären, also durch Koaleszenz im Bereich der frei sedimentierenden Dispersion. Zudem wird durch die Füllkörper auch die Tropfen-Grenzflächen-Koaleszenz beeinflusst. Beim Absetzversuch ohne Einbauten ist die Sedimentation bereits abgeschlossen, während die Koaleszenz der verbleibenden dichtgepackten Schicht noch fortschreitet und somit für das Ende des Absetzvorgangs bestimmend ist. Durch den Einsatz der Füllkörper haben sich diese Verhältnisse nahezu umgekehrt. Trotz der Tatsache, dass nun aufgrund der steileren Sedimentationskurve pro Zeiteinheit mehr Tropfen die dichtgepackte Schicht erreichen, ist hier die Koaleszenz bereits abgeschlossen, während die Sedimentation der Tropfen noch weiter fortschreitet. Die Tropfen, die nun noch die Grenzfläche erreichen, koaleszieren so schnell mit der Phasengrenze, dass keine dichtgepackte Schicht mehr gebildet wird. Die Tropfen-Grenzflächen-Koaleszenz wird also durch die Füllkörper erheblich begünstigt.

Für die Modellierung des Absetzvorgangs mit Füllkörpern werden aufgrund der Beobachtungen aus dem Absetzversuchen folgende Annahmen gemacht:

- Die Bewegung der frei sedimentierenden Tropfen wird durch die Füllkörper behindert, wodurch die Sedimentationsgeschwindigkeit herabgesetzt wird.
- Im Bereich der frei sedimentierenden Tropfen kommt es in der Füllkörperpackung zu Koaleszenz zwischen Tropfen und damit zu einem Anstieg der Tropfengrößen.
- Die Koaleszenz der Tropfen an der Grenzfläche wird durch die Füllkörper beschleunigt.

Im folgenden werden die Umsetzung dieser Annahmen als Erweiterung des Modells nach Henschke erläutert und die Ergebnisse der Modellierung diskutiert.

Sedimentation in der Füllkörperpackung

Die Sedimentationsgeschwindigkeit der Tropfen in der Füllkörperpackung wird mit einem Ansatz von Mersmann (1980) aus der aktuellen Sedimentationsgeschwindigkeit der Tropfen im Schwarm berechnet:

$$v_{S,FK} = \frac{v_S}{1 + 1,4 \cdot \left[\frac{v_S^2 \cdot \rho_d}{(D_{FK} - D_{stab}) \cdot \Delta\rho \cdot g} \right]^{\frac{2}{3}}} \quad (4-8)$$

mit dem Durchmesser des größten stabilen Tropfens:

$$D_{stab} = 2,44 \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\Delta\rho \cdot g}} \quad (4-9)$$

Koaleszenz im Bereich der frei sedimentierenden Tropfen

Für die Koaleszenz der frei sedimentierenden Tropfen untereinander wird eine Koaleszenzwahrscheinlichkeit p_K formuliert. Da im Bereich der frei sedimentierenden Tropfen von einem monodispersen Tropfenschwarm ausgegangen wird, hängt die Wahrscheinlichkeit nur vom örtlichen Holdup der dispersen Phase ε ab und der Länge des betrachteten Zeitintervalls Δt ab:

$$p_K = C_{TK} \cdot \varepsilon \cdot \Delta t \quad (4-10)$$

In dieser Gleichung ist der Parameter C_{TK} eine unbekannte Größe. Er ist von der Art des eingesetzten Füllkörpers und dem jeweiligen Stoffsystem abhängig und kann durch Anpassung an Messwerte der Sedimentationskurven bestimmt werden. Die Koaleszenzwahrscheinlichkeit p_K legt den Anteil der Tropfen in einem Volumenele-

ment Δh fest, die sich untereinander durch Tropfen-Tropfen-Koaleszenz vereinen. In einem Volumenelement befinden sich zu jedem Zeitpunkt

$$n = \frac{6 \cdot \Delta h \cdot \varepsilon}{\pi \cdot D_{Tr}^3} \quad (4-11)$$

Tropfen, von denen

$$n_K = n \cdot p_K \quad (4-12)$$

Tropfen koaleszieren. Für die Koaleszenzwahrscheinlichkeit werden deshalb nur Werte $0 \leq p_K \leq 1$ zugelassen. Es wird davon ausgegangen, dass nur jeweils zwei Tropfen miteinander koaleszieren. Diese bilden einen neuen Tropfen mit einem Tropfendurchmesser von

$$D_{Tr,neu} = \sqrt[3]{2} \cdot D_{Tr,alt} = 1,26 \cdot D_{Tr,alt} \quad (4-13)$$

Durch die Koaleszenz eines Teils der Tropfen müsste das anfangs als monodispers angenommene Tropfenspektrum im weiteren Verlauf als polydispers betrachtet werden. Dem Modell von Henschke liegt jedoch die Annahme zugrunde, dass das Tropfenspektrum monodispers ist und sich die Dispersion durch den Sauterdurchmesser Φ_{32} beschreiben lässt. Aus diesem Grund wird das nach der Koaleszenz eines Teils der Tropfen veränderte Tropfenspektrum erneut durch einen nun geänderten Sauterdurchmesser beschrieben:

$$\Phi_{32,neu} = \frac{(1-p_K) \cdot d_{Tr,alt}^3 + \frac{p_K}{2} \cdot d_{Tr,neu}^3}{(1-p_K) \cdot d_{Tr,alt}^2 + \frac{p_K}{2} \cdot d_{Tr,neu}^2} \quad (4-14)$$

Mit der vorgestellten Modellierung ändert sich im Bereich der frei sedimentierenden Dispersion nur der mittlere Tropfendurchmesser Φ_{32} und damit verbunden auch die Sedimentationsgeschwindigkeit der Tropfen. Der örtliche Holdup der dispersen Phase ε bleibt unverändert. Da im Bereich der frei sedimentierenden Dispersion zu Beginn des Absetzversuchs in jedem Volumenelement der gleiche Holdup der dispersen Phase ε_0 und der gleiche Sauterdurchmesser $\Phi_{32,0}$ vorliegt, ändert sich der aktuelle Sauterdurchmesser Φ_{32} und damit die Sedimentationsgeschwindigkeit der Tropfen in allen Volumenelementen in gleichem Maß.

Koaleszenz in der dichtgepackten Schicht

Die Absetzversuche mit Füllkörpern haben gezeigt, dass die Koaleszenz der Tropfen an der Grenzfläche durch die Anwesenheit der Füllkörper erheblich beschleunigt wird. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Struktur der Füllkörperpackung sehr gleichmäßig verteilt ist und die Grenzfläche so unabhängig von ihrer aktuellen Lage stets von einem Teil der Einbautenstruktur durchdrungen wird. Normalerweise ruht ein Tropfen solange an einer ebenen freien Grenzfläche, bis der Film zwischen Tropfen und Grenzfläche aufgrund des schwerkraftinduzierten Drucks auf den Film ausgeflossen ist. Die Einbautenstruktur durchstößt nun, insbesondere bei einer guten Benetzung der Einbauten durch die disperse Phase, die Grenzfläche und die Oberfläche des Tropfens, so dass der Inhalt des Tropfens schneller ablaufen und mit seiner kohärenten Phase koaleszieren kann. Die Vorgänge der Filmdrainage und des Ausfließens des Films werden dadurch erheblich verkürzt.

Dieser Effekt der Füllkörper wird durch einen Parameter C_{TGK} berücksichtigt. Mit ihm kann nun die verringerte Koaleszenzzeit der Tropfen an der Grenzfläche berechnet werden. Die Tropfen-Grenzflächen-Koaleszenzzeit in der Füllkörperpackung

$$\tau_{TGK,FK} = C_{TGK} \cdot \tau_{TGK} \quad (4-15)$$

berechnet sich mit dem Parameter C_{TGK} aus der Koaleszenzzeit an der ebenen Grenzfläche τ_{TGK} . Der Parameter C_{TGK} wird dabei an Messwerte der Koaleszenzkurven angepasst.

Ergebnisse der Modellierung

Um nun einen Absetzversuch mit Füllkörpern anhand des Modells nach Henschke und der vorgestellten Modellerweiterungen zu berechnen, wurde zunächst der dazugehörige Absetzversuch ohne Einbauten ausgewertet. Dabei wurden der anfängliche mittlere Tropfendurchmesser $\Phi_{32,0}$, die Totzeit t_{tot} und der Asymmetrieparameter r_s^* ermittelt. Diese Größen werden für den nachfolgenden Absetzversuch mit Füllkörpern als unverändert angenommen.

Abb. 4-10 zeigt gemessene und berechnete Absetzkurven für Versuche mit Füllkörpern mit dem Stoffsystem Cyclohexanon + Wasser.

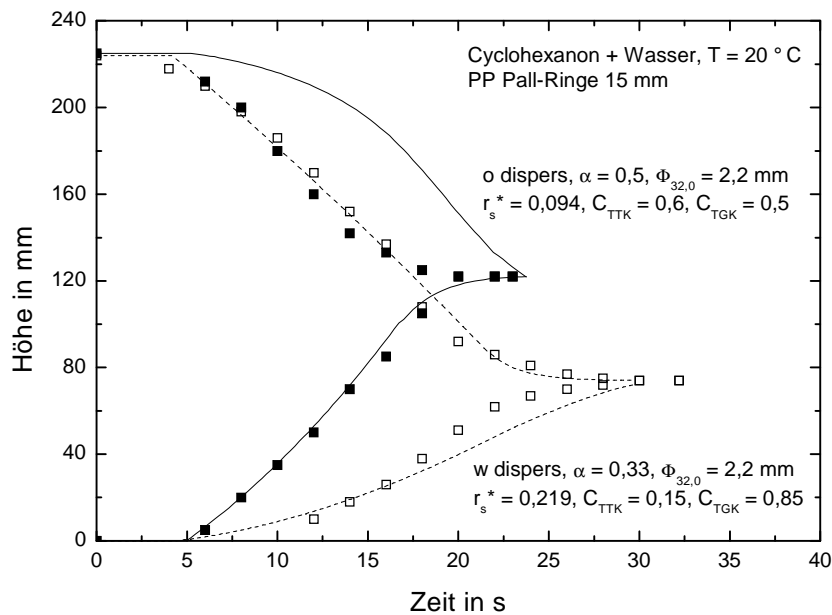


Abb. 4-10: Gemessene und berechnete Absetzversuche mit Füllkörpern

Der Vergleich der gemessenen und berechneten Absetzkurven zeigt, dass in beiden Fällen der Verlauf der Sedimentationskurve, insbesondere auch die beobachtete leichte Krümmung der Kurve, gut wiedergegeben wird. Während der Verlauf der Koaleszenzkurve bei disperser wässriger Phase noch zufriedenstellend abgebildet wird, sind bei disperser organischer Phase erhebliche Abweichungen zu den Messwerten zu erkennen. Der prinzipielle Verlauf der Koaleszenzkurve ist zwar ebenfalls s-kurvenförmig, jedoch wird die Koaleszenz zu Beginn des Versuchs zu gering (flache Steigung) und zum Ende des Versuchs zu hoch (große Steigung) berechnet. Eine mögliche Erklärung für die schlechte Beschreibbarkeit der gemessenen Koaleszenzkurven mit den vorgestellten Modellen liegt in der Koaleszenz der Tropfen während der Sedimentation und dem daraus resultierenden polydispersen Tropfenspektrum begründet.

Im Bereich der frei sedimentierenden Dispersion findet unter dem Einfluss der Füllkörper Koaleszenz zwischen einem Teil der Tropfen statt. Es bilden sich dadurch größere Tropfen, die eine dementsprechend höhere Sedimentationsgeschwindigkeit besitzen (solange sie formstabil sind). Sie bewegen sich also schneller als die kleineren Tropfen und lassen diese hinter sich zurück, wodurch hier der Holdup der dispersen Phase sinkt. Der Vorgang der Abnahme des Holdups im Bereich der frei sedimentierenden Dispersion kann auch im Experiment beobachtet werden. Dort nimmt

der Kontrast des ansonsten undurchsichtigen Bereichs der Dispersion im Verlauf des Versuchs stetig ab, was auf eine Abnahme des Holdups der dispersen Phase zurückzuführen ist. Die sichtbare Sedimentationsgrenze wird dabei durch die langsamen kleineren Tropfen gebildet, die noch nicht koalesziert sind.

Die Aufweitung des Tropfenspektrums kann mit dem Modell nach Henschke aufgrund der Voraussetzung eines monodispersen Tropfenspektrums nicht berücksichtigt werden. Durch die Verwendung des Sauterdurchmessers wird die koaleszenzbedingte Zunahme der Tropfengröße und damit der Sedimentationsgeschwindigkeit über alle Tropfen gemittelt. Die frei sedimentierenden Tropfen werden hier also alle gleichzeitig um den gleichen Betrag größer und damit schneller. Dies führt zu der über nahezu der gesamten Versuchsdauer stetig zunehmenden Steigung der berechneten Koaleszenzkurve.

Könnte nun die zunehmende Polydispersität des Tropfenspektrums in einem Modell berücksichtigt werden, so erreichen die größeren und schnelleren Tropfen die Grenzfläche wesentlich eher führen und zu einer zunächst größeren Steigung der Koaleszenzkurve. Die fortlaufende Abnahme des Holdups der dispersen Phase im Bereich der frei sedimentierenden Dispersion bewirkt dann im weiteren Verlauf des Absetzvorgangs eine deutlich geringere Zufuhr disperser Phase an die Grenzfläche und damit eine geringere Steigung der Koaleszenzkurve. Dies würde qualitativ dem Verlauf der in den Experimenten beobachteten Koaleszenzkurven entsprechen.

Zur Beschreibung eines solchen polydispersen Tropfenspektrums bieten sich für zukünftige Untersuchungen Modelle an, bei denen die vorliegende Dispersion nicht mit mittleren Werten wie Holdup und Sauterdurchmesser charakterisiert wird, sondern die einzelnen Tropfen der Dispersion vom Beginn des Absetzvorgangs bis zu dessen Ende oder vorher der Koaleszenz mit der zugehörigen kohärenten Phase betrachtet werden. Aus diesem Grund wurde eine entsprechende Modellierung mit dem ReDrop-Algorithmus durchgeführt, (Henschke, 2003), bei der sich eine entsprechend durch die Koaleszenz gekrümmte Sedimentationskurve sehr ausgeprägt ergab. Die Koaleszenz kann allerdings mit diesem Modell bisher noch nicht beschrieben werden, da das Verhalten dichtgepackter Dispersionsschichten in dem für die Extraktion entwickelten Programm bisher nicht berücksichtigt wird. Hier bietet sich aber zukünftig Potential für eine Weiterentwicklung der detaillierten Modellierung.

4.4 Auslegungskonzept

Mit dem neuen Absatzversuch in der Rührzelle mit Einbauten bietet sich die Möglichkeit, Abscheider mit Einbauten nach einem Konzept auszulegen, das auf der Durchführung von einfachen und schnell durchzuführenden Laborversuchen basiert. Dieses Auslegungskonzept ist in Abb. 4-11 schematisch dargestellt.

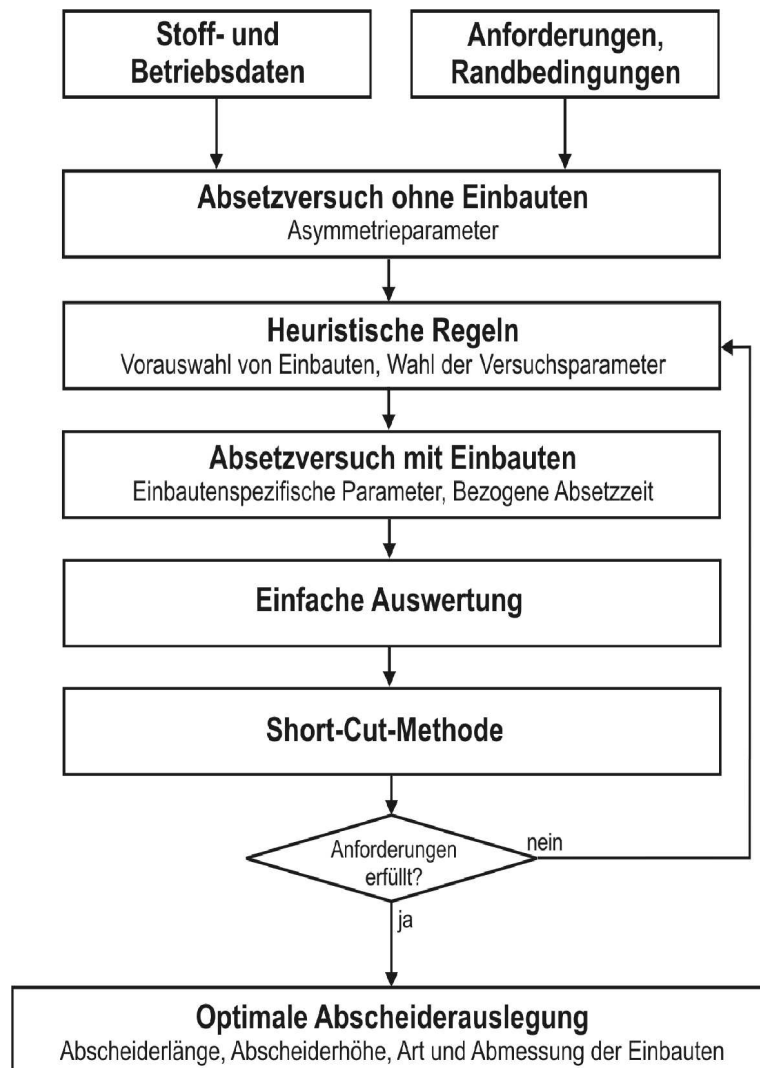


Abb. 4-11: Auslegungskonzept

Eingang finden hier zunächst die bekannten Stoffdaten (z. B. Dichten, Viskositäten und Grenzflächenspannung) und Betriebsdaten (z. B. Volumenstrom, Phasenverhältnis, Dispersionsrichtung, Temperatur und Druck). Diese können durch verschiedene Anforderungen und Randbedingungen (z. B. zulässiger Fremdphasenaustrag oder zur Verfügung stehender Platz) ergänzt werden.

In einem ersten Schritt werden nun Absetzversuche in der Rührzelle ohne Einbauten durchgeführt. Diese liefern zum einen direkte Erkenntnisse zum Trennverhalten des jeweiligen Stoffsystems (z. B. Absetzzeit und Verlauf der Absetzkurven) und zum anderen den Asymmetrieparameter, der zur Charakterisierung des Koaleszenzverhaltens des Stoffsystems bei der Modellierung benötigt wird. Bei den Absetzversuchen lassen sich gegebenenfalls auch schon stoffsystemspezifische Problematiken erkennen, wie z. B. Mulm- oder Häutchenbildung oder Bildung von Feinsttrübe bei scherempfindlichen Stoffsystemen.

Der Umfang der nun durchzuführenden Absetzversuche in der Rührzelle mit Einbauten wird unter Berücksichtigung heuristischer Regeln auf der Basis der bisher zur Verfügung stehenden Informationen festgelegt. Die heuristischen Regeln schränken dabei die Auswahl der zur Lösung des Trennproblems in Frage kommenden Einbauten anhand verschiedener Kriterien sinnvoll ein und erleichtern darüber hinaus die Festlegung von Art und Umfang der zu variierenden Versuchsparemeter.

Mit den verschiedenen vorausgewählten Einbauten werden nun Absetzversuche in der Rührzelle mit Einbauten durchgeführt. Aufgrund der vergleichbaren Versuchsbedingungen können die verschiedenen Einbauten hier schon direkt bezüglich ihrer Wirksamkeit bei der diskontinuierlichen Dispersionstrennung bewertet werden. Darüber hinaus können aus den Absetzversuchen Erkenntnisse gewonnen werden, die zur Auslegung des Abscheiders benötigt werden. Darunter fällt z. B. die bezogene Absetzzeit.

Die einfach und schnell durchführbaren Absetzversuche ohne und mit Einbauten in der Rührzelle ermöglichen so einen Vergleich verschiedener Einbauten bezüglich ihrer Trennwirksamkeit anhand der bezogenen Absetzzeit. Zudem kann die Sensitivität der jeweiligen Einbauten gegenüber verschiedenen Einflussgrößen untersucht werden. Wichtige Einflussgrößen, die im Absetzversuch in der Rührzelle untersucht werden können, sind die Volumenanteile der Phasen, die durch Rückführung ggf. auch in einem Prozess verändert werden können, die Dispersionsrichtung, das Einbautenmaterial und die charakteristischen Abmessungen der Einbauten.

Die Auslegung des Abscheiders kann nun anhand der Short-Cut-Methode erfolgen. Dazu wird die bezogene Absetzzeit aus den Absetzversuchen in der Rührzelle mit

Einbauten unter Verwendung des entsprechenden Proportionalitätsfaktors in die zugehörige bezogene Trennlänge umgerechnet. Dabei kann für Platten von $\kappa = 1$ und für Füllkörper mit einer charakteristischen Abmessung von 15 mm von $\kappa = 0,5$ ausgegangen werden. Für andere geometrische Verhältnisse muss κ mit Hilfe eines Technikumsversuchs ermittelt werden. Die Abweichung bei Verwendung der Short-Cut-Methode ist dabei kleiner 25 % (siehe 4.2), was für übliche Auslegungen völlig ausreichend ist. Mit der Trennlänge des Abscheiders ohne Einbauten, die mit dem Modell von Henschke ermittelt wird, kann nun aus der bezogenen Trennlänge die Trennlänge des Abscheiders mit Einbauten berechnet werden.

Modellansätze zur Beschreibung der Dispersionstrennung in Platteneinbauten und Füllkörperpackungen wurden in 4.3.2 und 4.3.3 vorgestellt. Diese erlauben jedoch noch keine vollständige Beschreibung des Trennvorgangs im Abscheider mit Einbauten. Hier bieten sich interessante Erweiterungs- und Verbesserungsmöglichkeiten für zukünftige Forschungsvorhaben zur Auslegung von Abscheidern mit Einbauten.

Nach der Auslegung des Abscheiders mit der Short-Cut-Methode ist zu prüfen, ob das Ergebnis eine sinnvolle Lösung des Trennproblems darstellt und die zuvor definierten Anforderungen und Randbedingungen erfüllt. Sollte dies nicht der Fall sein, müssen erneut die heuristischen Regeln herangezogen und die Auswahl der zu untersuchenden Einbauten entsprechend erweitert werden. Sind die Anforderungen und Randbedingungen schlussendlich erfüllt, so erhält man die für das Trennproblem optimalen Abscheiderabmessungen sowie Art und Abmessungen der Einbauten.

5 Gegenüberstellung Ergebnisse und Zielsetzung

Ziel des Forschungsprojektes war die Entwicklung einer wissenschaftlich fundierten Methode zur Auslegung von Abscheidern mit Einbauten, die es ermöglicht, ohne den Einsatz von Technikumsversuchen eine zuverlässige Auslegung durchzuführen.

Um dieses Ziel zu erreichen, sollte ein neuer Absetzversuch entwickelt werden, der den Effekt der Einbauten quantifiziert. Dieser Absetzversuch wurde entwickelt und validiert. Mit Versuchen an Originalgemischen, die in wenigen Stunden durchgeführt werden können, ist so eine quantitative Aussage über den Trenneffekt unterschiedlicher Einbauten als Funktion wesentlicher Prozessparameter wie z. B. Einbautengeometrie und eingesetztem Phasenverhältnis möglich.

Es sollten im Abscheider weitere Versuche durchgeführt werden, die die Stoffdatenbasis insbesondere in Richtung höherviskoser Systeme und solcher Systeme erweitern, die eine längere Absetzzeit aufweisen. Entsprechend wurden Experimente an der Abscheideranlage im Technikumsmaßstab durchgeführt mit einer höherviskosen Tridecanol-Phase und einem Stoffsystem, dem Salz zur Verlängerung der Absetzzeit zugesetzt wurde. Das Tridecanol-System zeigte bei den Versuchen instabiles Verhalten und Mulmbildung, die die Ermittlung reproduzierbarer Ergebnisse sehr aufwändig machte. Zudem zeigte sich, dass das ebenfalls zu vermessende Toluol-System die Einbauten aus PP angriff. Insgesamt konnte trotz dieser Widrigkeiten ein umfangreiches Messprogramm absolviert und so die Datenbasis insbesondere in Richtung zu Systemen, die technische Herausforderungen darstellen, entscheidend erweitert werden.

Als Basis für die Abscheider-Auslegung sollten Heuristiken zu Einbautenauswahl und wesentlichen Betriebsparametern aufgestellt werden. Hier zeigte sich, dass anscheinend selbst in der anwendenden Industrie die belastbare Erfahrung mit Abscheidern mit Einbauten recht begrenzt ist. Dennoch wurden aus unterschiedlichsten Quellen Aussagen zur Auswahl von Einbauten zusammengetragen und um die Erfahrungen aus diesem Projekt ergänzt. Damit wurde alles verfügbare Wissen in Form von einfachen heuristischen Regeln zur Verfügung gestellt.

Eine schnelle Auslegung sollte mit Hilfe einer Short-Cut-Methode ermöglicht werden. Es zeigte sich, dass in allen Fällen die Verkürzung der Absetzzeit im Absetzversuch mindestens der Einsparung an Abscheiderlänge durch die Einbauten entspricht. Bei Einbauten mit kleineren charakteristischen geometrischen Abmessungen kann sogar eine darüber hinaus gehende Einsparung erzielt werden. Diese einfache Short-Cut-Methode erlaubt so einfach, preiswert und schnell eine quantitative Aussage über die maximal benötigte Abscheiderlänge.

Zudem sollte eine detailliertere Auslegung angestrebt werden, die eine erhöhte Auslegungsgenauigkeit und Vorhersagekraft aufweist. Hier zeigte sich, dass der Absetzversuch im Detail prinzipiell mit recht guter Genauigkeit beschrieben werden kann, wobei unterschiedliche Einbauten eine jeweils individuelle Modellierung nötig machen. Es zeigte sich, dass der Effekt, dass die Einbauten den Dispersionskeil deutlich aufstauen, zu einer wesentlichen Verkürzung der benötigten Abscheiderlänge beitragen. Um bei diesem Einfluss die Absetzversuche auf einen Abscheider übertragen zu können, wird darüber hinaus gehend eine Beschreibung der Wechselwirkung einer strömenden Dispersion mit Einbauten benötigt. Zu diesem Problem sind in der Literatur keine genauen Ansätze bekannt. Bereits bei der Beschreibung der Dispersionsviskosität sind eine Vielzahl von Ansätzen verfügbar, deren Aussagen sehr uneinheitlich sind. Somit ist die detaillierte Modellierung der Absetzversuche zwar prinzipiell möglich, eine detailliertere Abscheidermodellierung hat aber zunächst zur Voraussetzung, dass in entsprechenden Grundlagenuntersuchungen ein quantitatives Modell zur Beschreibung der Strömung von Dispersionen in Wechselwirkung mit Einbauten entwickelt wird.

Somit konnte insgesamt das Ziel erreicht werden, eine auch für kleine und mittelständische Unternehmen anwendbare Methode zur Auslegung von Abscheidern mit Einbauten zu entwickeln. Basierend auf den heuristischen Regeln kann eine erste Vorauswahl möglicher Einbauten vorgenommen werden. Mit dem neuen Absetzversuch kann anschließend der Einfluss unterschiedlicher Einbauten und Betriebsparameter auf das Absetzverhalten eines Originalgemisches quantifiziert werden, das mit der Short-Cut-Methode dann eine Übertragung auf technische Abscheider ermöglicht.

6 Hinweis auf Förderung

Das Forschungsvorhaben wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) gefördert.

7 Anhang

7.1 Formelzeichen und Abkürzungen

Lateinische Buchstaben

<i>a</i>	Plattenabstand	m
<i>c</i>	Konzentration	kg/l
<i>C</i>	Modellparameter	-
<i>d</i>	Durchmesser	m
<i>D</i>	Durchmesser	m
<i>h</i>	Höhe	m
<i>L</i>	Länge	m
<i>M</i>	Molare Masse	kg/mol
<i>m</i>	Öffnungsverhältnis	-
<i>m</i>	Masse	kg
<i>N</i>	Normalität	mol/l
<i>n</i>	Drehzahl	s ⁻¹
<i>n</i>	Anzahl	-
<i>p</i>	Wahrscheinlichkeit	-
<i>T</i>	Temperatur	°C
<i>t</i>	Zeit	s
<i>t</i>	Plattendicke	m
<i>V</i>	Volumen	l
<i>v</i>	Geschwindigkeit	m/s
\dot{V}	Volumenstrom	m ³ /s
<i>w</i>	Massenanteil	kg/kg

Griechische Buchstaben

α	Volumenanteil der wässrigen Phase	m
Δ	Differenz	-
ε	Holdup der dispersen Phase	m^3/m^3
Φ	Tropfendurchmesser	m
η	Viskosität	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
φ	Plattenneigungswinkel	°
κ	Proportionalitätsfaktor	-
ρ	Dichte	kg/m^3
σ	Grenzflächenspannung	N/m
τ	Koaleszenzzeit	s

Indizes

32	Mittelwert nach Sauter
alt	
bez	bezogen
Dis	Dispersion
E	Ende
FK	Füllkörper
ges	Gesamt
neu	
o	organische Phase
R	Rührer
S	Sedimentation
stab	stabil
TGK	Tropfen-Grenzflächen-Koaleszenz
tot	Totzeit
TTK	Tropfen-Tropfen-Koaleszenz
w	wässrige Phase

7.2 Veröffentlichungen

Zu den laufenden Arbeiten im Rahmen dieses Forschungsvorhabens und den daraus gewonnenen Ergebnisse wurde in Vorträgen auf der ACHEMA 2003 in Frankfurt [11] und der gemeinsamen Sitzung der Fachausschüsse (GVC / DECHEMA) "Das Neue geschieht an den Grenzflächen" in Würzburg [10] berichtet.

7.3 Gewerbliche Schutzrechte

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden keine gewerblichen Schutzrechte erworben. Eine Anmeldung von gewerblichen Schutzrechten ist nicht beabsichtigt.

7.4 Analytik

Die im folgenden vorgestellte Analytik wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens zur Bestimmung der wesentlichen Stoffdaten Dichte, Viskosität und Grenzflächen-spannung eingesetzt. Alle Messungen wurden bei $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ durchgeführt.

Die Ermittlung der Dichte erfolgte mit einem Dichtemessgerät DSA 48 der Firma Chempro GmbH, Hanau, für das von Herstellerseite eine Genauigkeit von $\pm 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$ und eine Reproduzierbarkeit von $\pm 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$ angegeben wird. Die Viskositätsmessung wurde mit einem Kugelfallviskosimeter System Höppler DIN 53015 der Firma Gebrüder Haake, Karlsruhe, durchgeführt. Die Reproduzierbarkeit der Messungen beträgt 0,3 %. Die Grenzflächenspannung wurde mit Hilfe eines Stalakmometers der Firma Normag Labor- und Verfahrenstechnik GmbH & Co., Hofheim a. Ts., bestimmt. Bei sorgfältiger Versuchsdurchführung wird eine Genauigkeit von $\pm 5 \%$ und eine Reproduzierbarkeit von 0,1 mN/m erreicht.

7.5 Materialuntersuchungen

Um die Ursache der stetigen Verschlechterung der Qualität des Systems Toluol + Wasser zu finden (siehe 3.4.4), wurde die Beständigkeit der verwendeten Einbautenmaterialien gegenüber dem System Toluol + Wasser anhand von Absetzversuchen in der Schüttelflasche geprüft (siehe 3.2.2). Dabei wurden sowohl Proben des PP-Materials, aus dem die Platten und die Stützringe des Plattenpakets bestehen (Probe 1), als auch Proben der Pall-Ringe aus PP untersucht (Probe 2). Als alternativer Werkstoff für die Einbauten wurde PVDF in Erwägung gezogen und ebenfalls

bezüglich seiner Beständigkeit geprüft (Probe 3). Die Entwicklung der Absetzzeiten der verschiedenen Proben über dem Versuchszeitraum ist in Abb. 7-1 dargestellt.

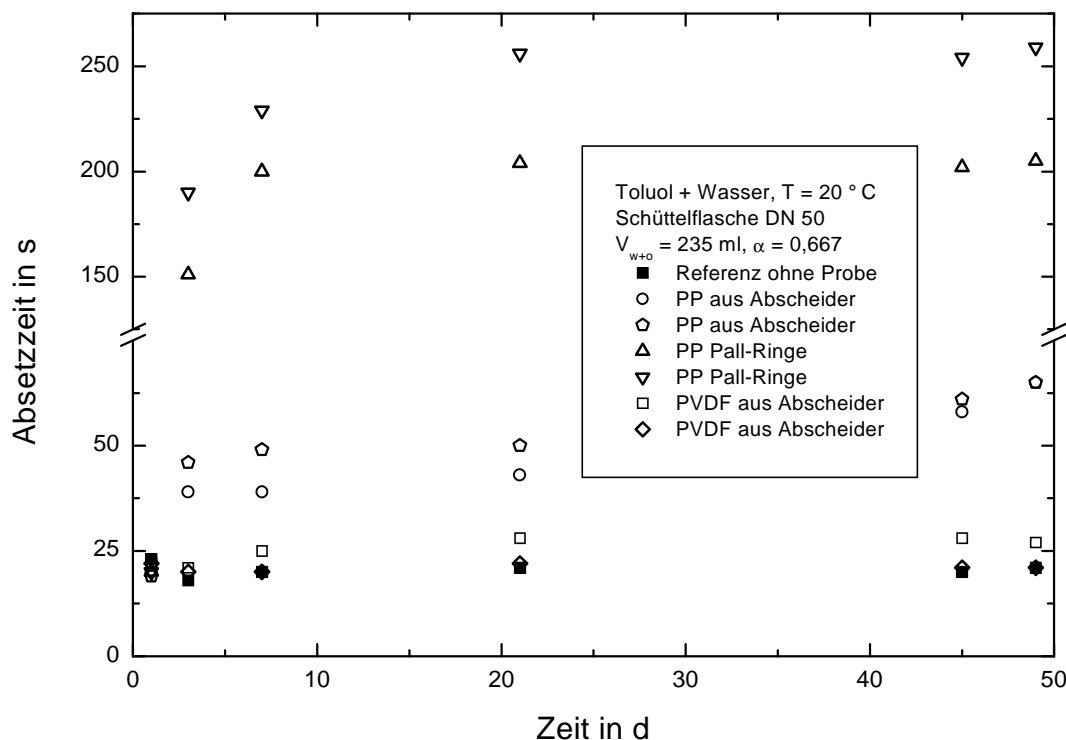


Abb. 7-1: Beständigkeitsversuche mit PP und PVDF in Toluol + Wasser

Die Absetzzeit für das System Toluol + Wasser ohne Probe hatte für den gesamten Versuchszeitraum von sieben Wochen eine Absetzzeit von etwa 20 s. Nach zwei Tagen betragen die Absetzzeiten der Probe 1 schon 40 bis 50 s und die der Probe 2 150 bis 190 s. Am Ende des Versuchszeitraums hatten sich die Absetzzeiten der Probe 1 auf etwa 65 s und die der Probe 2 auf 200 bis 260 s verlängert. Beide PP-Materialien sind also gegenüber Toluol + Wasser unbeständig und verändern nicht reproduzierbar die Qualität des Stoffsystems. Ein möglicher Grund dafür ist das Herauslösen Hilfsstoffen wie z. B. Weichmachern, die dem Material bei der Herstellung zugegeben werden. Der überwiegende Anteil der Stoffsystemänderung erfolgte innerhalb weniger Tage. Der Werkstoff PP ist deshalb für Versuche mit dem System Toluol + Wasser auf Dauer ungeeignet.

Die Absetzzeiten der Probe 3 stiegen nur leicht auf 20 bis 25 s an und blieben dann für den gesamten Versuchszeitraum konstant. Der Werkstoff PVDF ist also gegen-

über dem System Toluol + Wasser beständiger und kann zukünftig als Alternative für den Werkstoff PP beim System Toluol + Wasser eingesetzt werden.

7.6 Eingesetzte Verteilerlochbleche

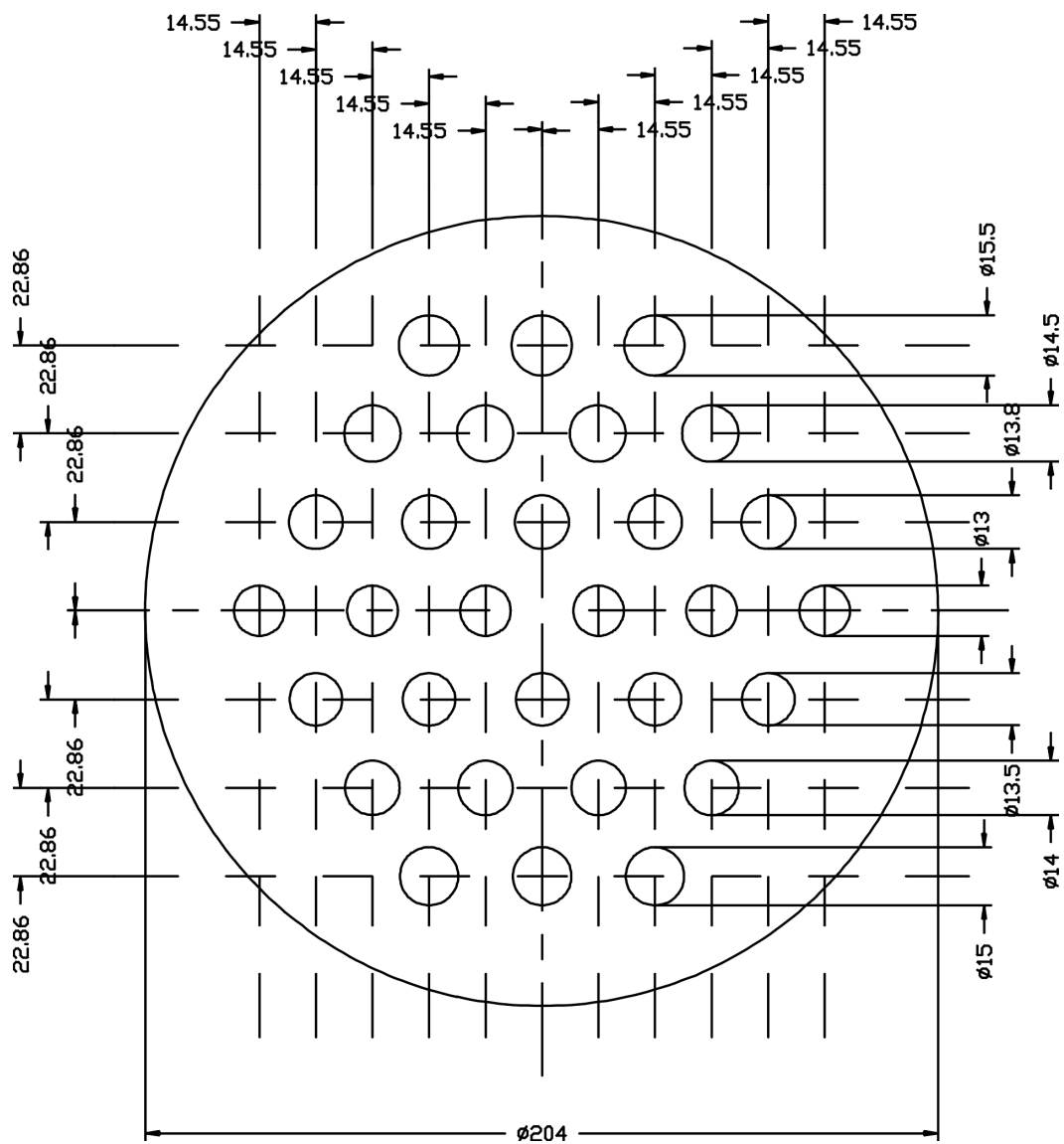


Abb. 7-2: Lochblech Typ A mit einem Öffnungsverhältnis von 0,15

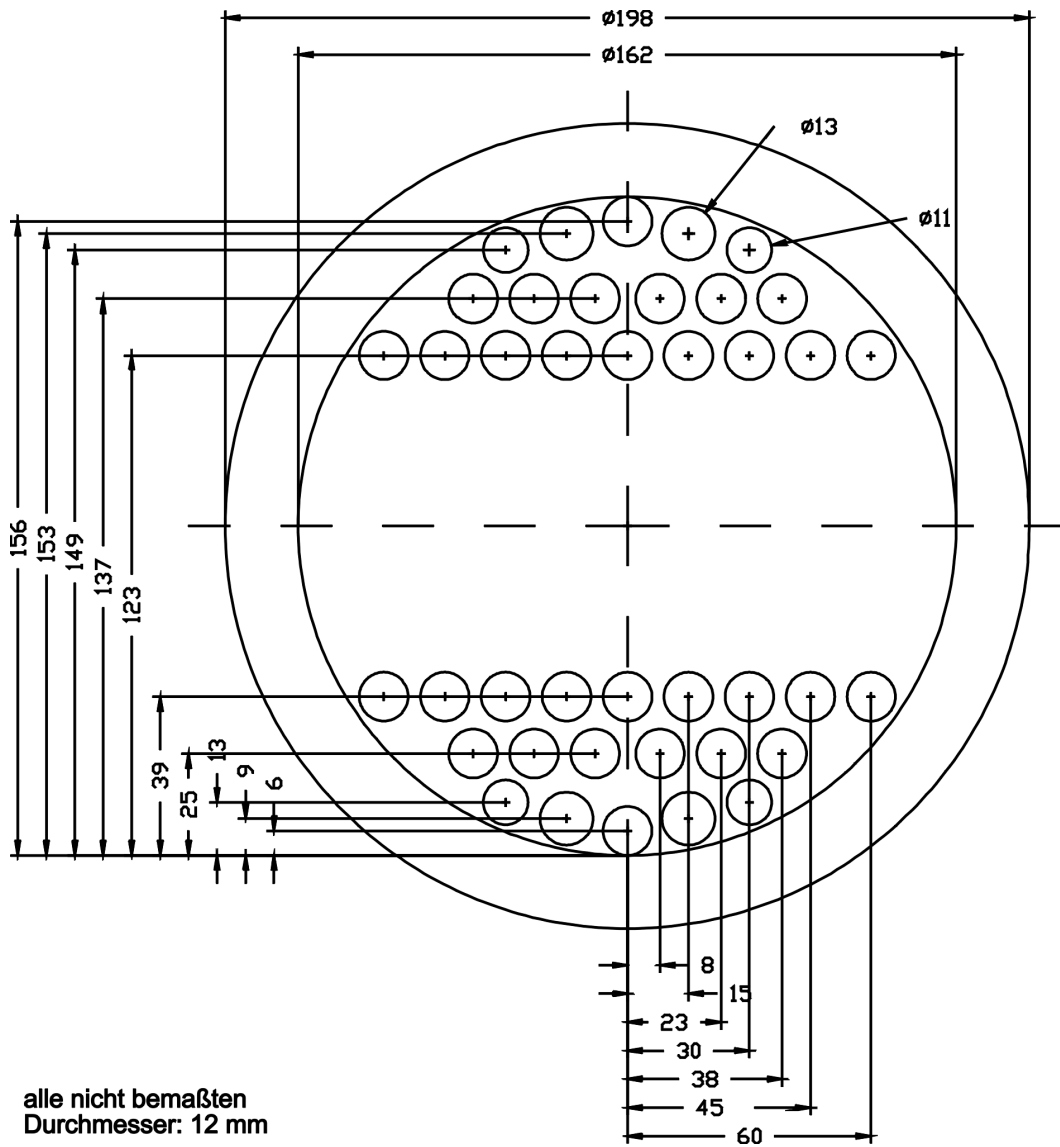


Abb. 7-3: Lochblech Typ C mit einem Öffnungsverhältnis von 0,15

7.7 Fragebögen zur Auslegung von Abscheidern mit Einbauten

Fragenkatalog zum Hochschul-/Industrie-Forschungsprojekt:

"Dimensionierung liegender Flüssig-Flüssig-Abscheider mit Einbauten auf der Basis von Laborversuchen"

Bearbeiter bzw. Ansprechpartner für Rückfragen:

Name:

Telefon:

E-Mail-Adresse:

Firma:

Teil 1: Fragebogen Allgemeines

1. Setzt Ihr Unternehmen Abscheider mit Einbauten zur Flüssig-Flüssig-Dispersionstrennung ein?		
Ja	Nein	Erläuterung
<i>Kommentar:</i>		

2. Zu welchem Zweck werden in Ihrem Unternehmen Einbauten in Flüssig-Flüssig-Abscheidern verwendet?			
Versuchszweck	Ja	Nein	Erläuterung
Erhöhung des Gesamtvolumenstroms (Debottlenecking)			
Reduzierung des Abscheidervolumens			
Reduzierung des Fremdphasenaustrags			
Nachrüstung			
Andere:			
<i>Kommentar:</i>			

3. Führt Ihr Unternehmen Vorversuche mit Flüssig-Flüssig-Abscheidern im Techni-kumsmaßstab durch?			
Versuchszweck	Ja	Nein	Erläuterung
Auslegung von Abscheidern			
Vergleich von Abscheidern mit und ohne Einbauten			
Auswahl von Einbautentypen			
Auswahl von Einbautenmaterialien			
Andere:			
<i>Kommentar:</i>			

**4. Führt Ihr Unternehmen Vorversuche im Labormaßstab (z.B. Absetzversuche, Benetzungsversuche, usw.) durch?
(Wenn ja, geben Sie bitte kurz Art und Durchführung der Versuche an.)**

Versuchszweck	Ja	Nein	Erläuterung
Charakterisierung des Stoffsystems			
Auslegung von Abscheidern			
Auswahl von Einbautentypen			
Auswahl von Einbautenmaterialien			
Andere:			
<i>Kommentar:</i>			

5. Verwendet Ihr Unternehmen Auslegungssoftware zur Auslegung von Flüssig-Flüssig-Abscheidern (wenn ja, welche)?

Ja	Nein	Erläuterung
<i>Kommentar:</i>		

6. Welche der folgenden Einbauten werden in Ihrem Unternehmen in Flüssig-Flüssig-Abscheidern verwendet?

Einbauten		Erläuterung
Plattenpakete		
Füllkörperpackungen		
Strukturierte Packungen (z.B. Mellapak, Rombopak, usw.)		
Gestrickpackungen		
Andere:		
<i>Kommentar:</i>		

7. a) Verwendet Ihr Unternehmen bereits Entscheidungshilfen / Heuristiken zur Auswahl von Einbauten?		
Ja	Nein	Erläuterung
<i>Kommentar:</i>		
7. b) Wenn ja, können uns diese zur Verfügung gestellt werden?		
Ja	Nein	Erläuterung
<i>Kommentar:</i>		

8. Mit welchen Einbauten hat Ihr Unternehmen besonders gute oder unerwartete Ergebnisse erzielt?
<i>Kommentar:</i>

Hinweise zum Fragebogen Allgemeines

Der allgemeine Fragenbogen soll im wesentlichen das prinzipielle Vorgehen bei der Auslegung von Abscheidern mit Einbauten und die dabei verwendeten (experimentellen und theoretischen) Hilfsmittel erfassen.

Der Schwerpunkt liegt dabei auf Einbauten zur Trennung von Primärdispersionen, also im wesentlichen auf Plattenpaketen, Füllkörperpackungen, strukturierten Packungen und Gestrickpackungen. Faserbettabscheider zur Trennung von Sekundärdispersionen werden nicht berücksichtigt.

Es wird um die Beachtung folgender Bearbeitungshinweise gebeten:

- Bitte füllen Sie den Fragebogen handschriftlich und leserlich aus.
- Bitte beantworten Sie Fragen und entsprechende Unterpunkte durch Ankreuzen und bei positiven Antworten ggf. mit näheren Erläuterungen (möglichst eindeutig).
- Die Kommentarzeile dient jeweils weiteren Differenzierungshinweisen und Anmerkungen.

Rücksendung / Rückfragen

Zur Rücksendung ausgefüllter Fragebögen und für eventuelle Rückfragen wenden Sie sich bitte an:

Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik
z. Hd. Herrn Dipl.-Ing. Nils Hüls Witt
Wüllnerstr. 5
52062 Aachen
Tel.: 0241 / 80 - 9 67 58
Fax.: 0241 / 80 - 9 23 32
E-Mail: nils.huelswitt@tvt.rwth-aachen.de

Teil 2: Fragebogen für konkrete Auslegungsbeispiele

Fragen zum Trennproblem

1. Bitte charakterisieren Sie mit möglichst vielen der folgenden Angaben das jeweilige Trennproblem! (Sollte es Ihnen nicht möglich sein, genaue Zahlenwerte anzugeben, geben Sie bitte eine ungefähre Dimension des jeweiligen Wertes an; z.B. $\Delta\rho < 50 \text{ kg/m}^3$)	
Stoffsystem (ggf. nur Stoffklassen angeben)	
Dichtedifferenz	
Viskosität disperse Phase	
Viskosität kontinuierliche Phase	
Grenzflächenspannung	
Phasenverhältnis (o/w volumetrisch)	
Dispersionstyp ("o in w" oder "w in o")	
Mittlere Eintrittstropfengröße	
Trennzeit	
Volumenstrom / Querschnittsbelastung	
Temperatur	
Druck	
Feststoffanteil	
Bereits bekannte Verunreinigungen / Störeinflüsse (z.B. Mulmbildung, usw.)	
Angestrebte Austrittstropfengröße	
Fremdphasenaustrag zugelassen?	
Andere:	
<i>Kommentar:</i>	

2. Mit welchen Einbauten wurde das zuvor charakterisierte Trennproblem gelöst?	
Verwendeter Einbautentyp (bitte charakteristische Abmessung angeben)	
Verwendetes Einbautenmaterial	
<i>Kommentar:</i>	

Fragen zur Entscheidungsfindung

1. Welche der folgenden Kriterien waren bei der Wahl des Einbautentyps für Sie entscheidend?			
Grenzflächenspannung		Temperatur	
Viskosität disperse Phase		Druck	
Viskosität kontinuierliche Phase		Feststoffanteil	
Dichtedifferenz		Tensidbelastung	
Dispersionstyp ("o in w" oder "w in o")		Mulmbildung	
Phasenverhältnis		angestrebte Austrittstropfengröße	
Eintrittstropfengrößen (Verteilung)		Fremdphasenaustrag	
Trennzeit		Druckverlust	
Verlauf der Trennvorgangs (Trennkurven)		Handhabung (Ein-/Ausbau, Reinigung)	
Volumenstrom / Querschnittsbelastung		Kosten	
Andere:			
<i>Kommentar:</i>			

2. Welche der folgenden Kriterien waren bei der Wahl der Werkstoffe für die Einbauten für Sie entscheidend?			
Chemische Beständigkeit / Korrosion		Benetzungseigenschaften	
Mechanische Stabilität		Kosten	
Temperaturbeständigkeit		Verfügbarkeit	
Andere:			
<i>Kommentar:</i>			

Hinweise zum Fragebogen für konkrete Auslegungsbeispiele

Der Fragebogen für konkrete Auslegungsbeispiele ergänzt den allgemeinen Fragebogen dahingehend, dass mit ihm konkrete Beispiele für eine Dimensionierung von Abscheidern mit Einbauten abgefragt werden sollen. Dabei erfasst er sowohl das jeweils zugrundeliegende Trennproblem als auch die Entscheidungsfindung und die schlussendlich gewählte Lösung (die konkret eingesetzten Einbauten). Wesentliches Ziel dieser Befragung ist herauszufinden, welche Aspekte des vorliegenden Trennproblems die Auswahl der eingesetzten Einbauten beeinflusst haben.

Der Schwerpunkt liegt dabei auf Einbauten zur Trennung von Primärdispersionen, also im wesentlichen auf Plattenpaketen, Füllkörperpackungen, strukturierten Packungen und Gestrickpackungen. Faserbettabscheider zur Trennung von Sekundärdispersionen werden nicht berücksichtigt.

Hinweise zur Auswahl der Auslegungsbeispiele:

Für die Entwicklung der Entscheidungshilfen sind insbesondere Auslegungsbeispiele interessant, denen ein *schwieriges oder außergewöhnliches Trennproblem* zugrunde liegt. Dies kann beispielsweise aufgrund von Grenzfällen bei Stoffdaten (z.B. niedrige Grenzflächenspannung, niedrige Dichtedifferenz, usw.) oder Störeinflüssen (z.B. Tensidbelastung, Mulmbildung, usw.) gegeben sein.

Wenn Sie Erfahrungen mit dem Einsatz verschiedener Einbautentypen in der Praxis gemacht haben, wäre es zudem wünschenswert, wenn Sie für jeden dieser Einbautentypen ein aussagekräftiges Auslegungsbeispiel finden könnten.

Es wird um die Beachtung folgender Bearbeitungshinweise gebeten:

- Bitte drucken Sie den Fragebogen mehrmals aus und füllen Sie ihn für verschiedene Auslegungsbeispiele jeweils gesondert aus (nur ein Beispiel je Fragebogen).
- Bitte füllen Sie den Fragebogen handschriftlich und leserlich aus.
- Bitte beantworten Sie Fragen und entsprechende Unterpunkte durch Ankreuzen und bei positiven Antworten ggf. mit näheren Erläuterungen (möglichst eindeutig).
- Die Kommentarzeile dient jeweils weiteren Differenzierungshinweisen und Anmerkungen.

Rücksendung / Rückfragen

Zur Rücksendung ausgefüllter Fragebögen und für eventuelle Rückfragen wenden Sie sich bitte an:

Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik
z. Hd. Herrn Dipl.-Ing. Nils Hüls Witt
Wüllnerstr. 5
52062 Aachen
Tel.: 0241 / 80 - 9 67 58
Fax.: 0241 / 80 - 9 23 32
E-Mail: nils.huelswitt@tvt.rwth-aachen.de

7.8 Versuchsprotokolle

7.8.1 Abscheiderversuche

7.8.1.1 System Tridecanol + Wasser

Versuchs-Nr.	Einbau	LB	α	Dispersions- richtung	Volumen- strom	Stauhöhe oben	Stauhöhe unten	Keilhöhe o- ben	Keilhöhe un- ten	Wand- ablösung	Keilende	Bandhöhe	Trübe o	Trübe w	Trenn- spiegelage
					l/h	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	-	-	mm
6101	PL ES 10 mm	A	0,50	o	300	+75	-28	+40	-19	115	130		1-2	1	0
6102	PL ES 10 mm	A	0,50	o	400	+75	-48	+70	-45	360	520		1-2	1	0
6103	PL ES 10 mm	A	0,50	o	500	+75	-60	+75	-70	540	670		1-2	1	0
6104	PL ES 10 mm	A	0,50	o	600	+75	-65	+80	-90	760	880		2	2	0
6105	PL ES 10 mm	A	0,33	o	300	+70	-33	+70	-27	190	210		2	1	0
6106	PL ES 10 mm	A	0,33	o	400	+70	-60	+60	-55	440	560		2	1	0
6107	PL ES 10 mm	A	0,33	o	500	+70	-75	+80	-80	680	780		2	1	0
6108	PL ES 10 mm	A	0,33	o	600	+70	-80	+85	-80	1660	1730		3	2	0
6109	PL ES 10 mm	A	0,67	o	300	+62	-16	+15	-12	80	310		2	1	0
6110	PL ES 10 mm	A	0,67	o	400	+70	-28	+80	-23	240	310		2	1	0
6111	PL ES 10 mm	A	0,67	o	500	+70	-39	+85	-42	350	510		2	1-2	0
6112	PL ES 10 mm	A	0,67	o	600	+70	-48	+85	-80	520	730		3	3	0
6113	PL ES 10 mm	A	0,17	o	300	+70	-41	+70	-35	190	380		2	1	0
6114	PL ES 10 mm	A	0,17	o	400	+60	-50	+30	-45	270	600		3	1	0
6115	PL ES 10 mm	A	0,17	o	500	+30	-50	+10	-60	210	740		4	1	0
6116	PL ES 10 mm	A	0,17	o	600	+65	-77	+35	-80	535	780		5	1-2	0
6117	PL ES 10 mm	A	0,83	o	300	+60	-9	+5	-6	25	150		2	1	0

6118	PL ES 10 mm	A	0,83	o	400	+70	-14	+25	-11	110	300		2	1	0
6119	PL ES 10 mm	A	0,83	o	500	+70	-18	+45	-16	185	300		3	1-2	0
6120	PL ES 10 mm	A	0,83	o	600	+70	-22	+60	-20	270	410		2-3	3	0
6121		A	0,50	o	300	+83		+17		570	710		2-3	1-2	0
6122		A	0,50	o	400	+85		+20		770	1250		3	2	0
6123		A	0,50	o	500	+90		+30		1100	1500		3-4	3	0
6124		A	0,50	o	600	+95		+35		1400	1600		2-3	4	-1
6125		A	0,33	o	300	+82		+24	+4	650	800		1-2	1	+1
6126		A	0,33	o	400	+89		+30	+1	1000	1520		2	1	-1
6127		A	0,33	o	500	+91		+35	-2	1450	1600		2	1-2	-1
6128		A	0,33	o	600	+95	-18	+40	-6	1580	1600		3	2-3	-1
6129		A	0,67	o	300	+75	-7	+10	-3	550	700		1-2	1	0
6130		A	0,67	o	400	+75	-11	+15	-4	835	970		2	1	0
6131		A	0,67	o	500	+75	-14	+17	-5	1050	1650		1	2	0
6132		A	0,67	o	600	+75	-15	+25	-7	1400	1700		2	3-4	0
6133		A	0,17	o	300	+75	-12	+20	-4	740	1000		1	1	0
6134		A	0,17	o	400	+55	-12	+15	-2	900	1100		2	1	0
6135		A	0,17	o	500	+35	-10	+12	-2	1200	1900		3	1	0
6136		A	0,17	o	600	+60	-12	+20	-4	1200	1900		5	1-2	0
6137		A	0,83	o	300	+50	-4	+5	-2	515	560		1	1	0
6138		A	0,83	o	400	+65	-6	+7	-2	880	910		2	1	0
6139		A	0,83	o	500	+67	-8	+10	-4	965	1100		2	1-2	0
6140		A	0,83	o	600	+70	-9	+13	-4	1100	1250		2-3	3	0
6141	PL ES 46 mm	A	0,50	o	300	+70	-12	+50	-5	340	490		2-3	1	0
6142	PL ES 46 mm	A	0,50	o	400	+75	-20	+60	-14	595	1700		3	1	0
6143	PL ES 46 mm	A	0,50	o	500	+75	-25	+70	-20	1410	1700		3-4	2-3	0
6144	PL ES 46 mm	A	0,50	o	600	+75	-33	+70	-28	1840	1840		4	4	0
6145	PL ES 46 mm	A	0,33	o	300	+75	-16	+65	-9	385	590		3	1	0
6146	PL ES 46 mm	A	0,33	o	400	+75	-25	+70	-17	1500	1840		3-4	1	0
6147	PL ES 46 mm	A	0,33	o	500	+75	-35	+70	-26	1700	1890		3-4	1-2	0
6148	PL ES 46 mm	A	0,33	o	600	+75	-40	+70	-30	1850	1900		3-4	3	0

6149	PL ES 46 mm	A	0,67	o	300	+65	-8	+20	-3	180	240		3-4	1	0
6150	PL ES 46 mm	A	0,67	o	400	+75	-13	+55	-9	320	480		3	1-2	0
6151	PL ES 46 mm	A	0,67	o	500	+75	-20	+60	-15	500	1440		3-4	3	0
6152	PL ES 46 mm	A	0,67	o	600	+75	-25	+55	-20	670	1410		4	4-5	0
6153	PL ES 46 mm	A	0,17	o	300	+75	-18	+70	-10	350	1750		3	1	0
6154	PL ES 46 mm	A	0,17	o	400	+75	-23	+70	-14	510	1750		3	1	0
6155	PL ES 46 mm	A	0,17	o	500	+55	-18	+45	-10	310	-		4	1	0
6156	PL ES 46 mm	A	0,17	o	600	+55	-22	+45	-15	440	-		5	1-2	0
6157	PL ES 46 mm	A	0,83	o	300	+65	-4	0	0	190	880		1-2	1	0
6158	PL ES 46 mm	A	0,83	o	400	+75	-7	+30	-4	270	310		4	1	0
6159	PL ES 46 mm	A	0,83	o	500	+75	-10	+55	-9	350	470		4	3	0
6160	PL ES 46 mm	A	0,83	o	600	+75	-13	+60	-12	510	1380		4	3-4	0
6161		A	0,67	o	300	+75	-6	+10	-2	600	590		3	1	0
6162		A	0,67	o	400	+75	-11	+15	-3	870	960		3	1	0
6163		A	0,67	o	500	+75	-14	+18	-5	1220	1400		3	3	0
6164		A	0,67	o	600	+75	-15	+16	-7	1400	1700		3	5	0
6165		A	0,33	o	300	+75	-9	+13	-3	670	800		2-3	1	0
6166		A	0,33	o	400	+75	-16	+22	-5	1000	1850		3	1	0
6167		A	0,33	o	500	+75	-20	+30	-8	1700	1750		3	3	0
6168		A	0,33	o	600	+75	-25	+35	-13	1830	1830		3	3	0
6169	PL ES 46 mm	A	0,33	o	300	+75	-15	+50	-8	185	100		3	1	0
6170	PL ES 46 mm	A	0,33	o	400	+75	-24	+70	-16	360	1700		3-4	1	0
6171	PL ES 46 mm	A	0,33	o	500	+75	-31	+75	-22	1610	1660		3-4	2	0
6172	PL ES 46 mm	A	0,33	o	600	+75	-37	+75	-30	1650	1740		4	3	0
6173	PL ES 46 mm	A	0,50	o	300	+75	-15	+70	-7	200	730		3	1	0
6174	PL ES 46 mm	A	0,50	o	400	+75	-22	+50	-13	350	1550		3	1-2	0
6175	PL ES 46 mm	A	0,50	o	500	+75	-26	+75	-20	390	1690		4	3	0
6176	PL ES 46 mm	A	0,50	o	600	+75	-30	+75	-25	1620	1680		4	4-5	0
6177	PL ES 46 mm	A	0,67	o	300	+70	-10	+45	-4	25	640		4	1	0
6178	PL ES 46 mm	A	0,67	o	400	+75	-15	+70	-10	185	770		4	1-2	0
6179	PL ES 46 mm	A	0,67	o	500	+75	-20	+70	-15	350	1400		4	3	0

6180	PL ES 46 mm	A	0,67	o	600	+75	-24	+60	-20	590	1520		4	4-5	0
6181	PL ES 46 mm	A	0,83	o	300	+55	-5	+5	-2	14	300		3-4	1	0
6182	PL ES 46 mm	A	0,83	o	400	+70	-9	+45	-7	85	710		3-4	1	0
6183	PL ES 46 mm	A	0,83	o	500	+75	-12	+50	-9	190	950		4	2	0
6184	PL ES 46 mm	A	0,83	o	600	+75	-14	+50	-12	310	1130		4	4	0
6185	PL ES 46 mm	A	0,10	o	300										
6186	PL ES 46 mm	A	0,17	o	400	-30	-100	-32	-70	170	190		3	1	0
6187	PL ES 46 mm	A	0,17	o	500	-40	-100	-40	-75	270	270		4	1	0
6188	PL ES 46 mm	A	0,17	o	600	-40	-100	-42	-75	380	380		4	1	0
6189		A	0,50	o	300	90	-11	22	-2	630	1050		2-3	1	0
6190		A	0,50	o	400	90	-15	30	-4	910	1600		2-3	1-2	0
6191		A	0,50	o	500	90	-17	30	-7	1180	1720		3	3	0
6192		A	0,50	o	600	90	-18	26	-11	1690	1760		3-4	5	0
6193		A	0,33	o	300	97	-12	30	-2	790	1400		3	1	0
6194		A	0,33	o	400	97	-17	34	-4	1140	1800		3-4	1	0
6195		A	0,33	o	500	97	-24	35	-8	13355	1850		3-4	3	0
6196		A	0,33	o	600	97	-22	40	-10	1850	1890		3-4	4	0
6197		A	0,67	o	300	92	-10	26	-1	790	890		3	1	0
6198		A	0,67	o	400	92	-13	25	-5	1050	1700		3-4	2	0
6199		A	0,67	o	500	93	-13	22	-4	1095	1770		3-4	3	0
6200		A	0,67	o	600	85	-15	24	-5	1750	1800		3	4-5	0
6201		A	0,83	o	300	79	-5	6	-1	750	840		3-4	1	0
6202		A	0,83	o	400	84	-7	13	-2	930	1050		4	2	0
6203		A	0,83	o	500	80	-9	15	-3	1010	1190		4	3	0
6204		A	0,83	o	600	70	-10	16	-5	1150	1280		3-4	4-5	0
6205	PL PP 10 mm	A	0,50	o	300	75	-20	20	-16	250	660		1-2	1	0
6206	PL PP 10 mm	A	0,50	o	400	75	-32	45	-29	670	800		2	1	0
6207	PL PP 10 mm	A	0,50	o	500	75	-42	52	-40	840	940		2	1	0
6208	PL PP 10 mm	A	0,50	o	600	75	-50	60	-50	1750	1790		3	3	0
6209	PL PP 10 mm	A	0,33	o	300	75	-28	35	-20	350	700		1-2	1	0
6210	PL PP 10 mm	A	0,33	o	400	75	-45	45	-35	840	940		1-2	1	0

6211	PL PP 10 mm	A	0,33	o	500	75	-55	60	-48	1800	1825		1-2	1	0
6212	PL PP 10 mm	A	0,33	o	600	75	-70	75	-62	1850	1890		2-3	2	0
6213	PL PP 10 mm	A	0,67	o	300	75	-15	15	-12	20	400		1-2	1	0
6214	PL PP 10 mm	A	0,67	o	400	75	-25	35	-18	400	650		2	1	0
6215	PL PP 10 mm	A	0,67	o	500	75	-30	45	-26	670	850		2	1	0
6216	PL PP 10 mm	A	0,67	o	600	75	-35	60	-35	830	920		2	3	0
6217	PL PP 10 mm	A	0,83	o	300	70	-8	7	-7	20	175		1-2	1	0
6218	PL PP 10 mm	A	0,83	o	400	75	-13	20	-10	340	425		1-2	1	0
6219	PL PP 10 mm	A	0,83	o	500	75	-16	32	-13	510	510		1-2	1	0
6220	PL PP 10 mm	A	0,83	o	600	75	-17	35	-17	670	700		2	3	0
6221	PL PP 46 mm	A	0,50	o	300	75	-11	35	-5	1390	1390		1-2	1	0
6222	PL PP 46 mm	A	0,50	o	400	75	-18	55	-10	1410	1750		3-4	1	0
6223	PL PP 46 mm	A	0,50	o	500	75	-24	55	-15	1790	1840		4	3	0
6224	PL PP 46 mm	A	0,50	o	600	75	-25	50	-19	1870	1900		4	4-5	0
6225	PL PP 46 mm	A	0,67	o	300	75	-10	40	-3	1330	1400		2-3	1	0
6226	PL PP 46 mm	A	0,67	o	400	75	-12	50	-7	1305	1390		3-4	1	0
6227	PL PP 46 mm	A	0,67	o	500	75	-19	50	-10	1320	1400		4	2-3	0
6228	PL PP 46 mm	A	0,67	o	600	75	-22	60	-14	1800	1830		4	4	0
6229	PL PP 46 mm	A	0,83	o	300	70	-5	5	-2	190	1060		3	1	0
6230	PL PP 46 mm	A	0,83	o	400	73	-8	20	-3	440	1400		4	1	0
6231	PL PP 46 mm	A	0,83	o	500	75	-9	25	-5	590	1560		3-4	2-3	0
6232	PL PP 46 mm	A	0,83	o	600	75	-12	30	-10	1220	1400		3-4	4	0
6233	PL PP 46 mm	A	0,33	o	300	70	-14	65	-2	1400	1830		3	1	0
6234	PL PP 46 mm	A	0,33	o	400	80	-21	70	-10	1410	1850		4	2	0
6235	PL PP 46 mm	A	0,33	o	500	80	-27	75	-18	1930	1930		4	3	0
6236	PL PP 46 mm	A	0,33	o	600	80	-32	80	-21	1950	1950		3-4	4	0
6237		C	0,5	o	300	+85	-16	+25	-2	450	850		2	1	0
6238		C	0,5	o	400	+85	-27	+25	-5	910	1360		2-3	1-2	0
6239		C	0,5	o	500	+80	-41	+36	-11	1390	1560		3	2-3	0
6240		C	0,5	o	600	+86	-46	+42	-15	1410	1600		3	4-5	0
6241		C	0,33	o	300	+80	-18	+30	-1	840	1500		3	1	0

6242		C	0,33	o	400	+75	-29	+45	-4	1400	1630		3	2	0
6243		C	0,33	o	500	+80	-40	+52	-10	1600	1700		3	2-3	0
6244		C	0,33	o	600	+80	-45	+60	-14	1680	1750		3	3	+1
6245		C	0,67	o	300	+80	-17	+20	-3	640	850		2	1	0
6246		C	0,67	o	400	+80	-24	+33	-4	1200	1390		2-3	2	0
6247		C	0,67	o	500	+77	-33	+35	-8	1390	1500		3	3	-1
6248		C	0,67	o	600	+75	-40	+40	-10	1460	1600		3	4	0
6249		C	0,83	o	300	+80	-12	+3	-2	110	350		2-3	1	0
6250		C	0,83	o	400	+80	-20	+12	-4	720	970		3	1-2	0
6251		C	0,83	o	500	+80	-23	+30	-2	1000	1300		3	2-3	+1
6252		C	0,83	o	600	+80	-30	+32	-5	1200	1400		4	5	0
6253	PL ES 10 mm	C	0,5	o	300	+75	-33	+27	-21	120	170		2	1	0
6254	PL ES 10 mm	C	0,5	o	400	+70	-60	+65	-55	390	490		2	1	0
6255	PL ES 10 mm	C	0,5	o	500	+70	-72	+65	-70	670	780		2	1-2	0
6256	PL ES 10 mm	C	0,5	o	600	+70	-75	+80	-70	910	1000		2	3	0
6257	PL ES 10 mm	C	0,33	o	300	+65	-46	+52	-29	120	230		2	1	0
6258	PL ES 10 mm	C	0,33	o	400	+65	-78	+80	-72	480	590		2	1	0
6259	PL ES 10 mm	C	0,33	o	500	+65	-82	+80	-70	780	870		2-3	1-2	-1
6260	PL ES 10 mm	C	0,33	o	600	+65	-85	+95	-80	1600	1740		3	2	0
6261	PL ES 10 mm	C	0,67	o	300	+70	-24	+30	-13	70	150		2	1	0
6262	PL ES 10 mm	C	0,67	o	400	+70	-46	+58	-29	210	260		2	1	0
6263	PL ES 10 mm	C	0,67	o	500	+75	-54	+70	-48	420	510		2	1-2	+1
6264	PL ES 10 mm	C	0,67	o	600	+75	-52	+80	-34	590	750		2	2-3	0
6265	PL ES 10 mm	C	0,83	o	300	+75	-16	+6	-8	15	45		2	1	0
6266	PL ES 10 mm	C	0,83	o	400	+80	-23	+27	-8	80	180		2	1	0
6267	PL ES 10 mm	C	0,83	o	500	+80	-31	+60	-16	180	270		2	1-2	0
6268	PL ES 10 mm	C	0,83	o	600	+75	-41	+80	-24	270	370		2	1-2	0

7.8.1.2 System Toluol + Wasser

Versuchs-Nr.	Einbau	LB	α	Dispersions- richtung	Volumen- strom	Stauhöhe oben	Stauhöhe unten	Keilhöhe o- ben	Keilhöhe un- ten	Wand- ablösung	Keilende	Bandhöhe	Trübe o	Trübe w	Trenn- spiegelage
					l/h	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	-	-	mm
6301	PL ES 10 mm	A	0,5	o	800	+70	-27	+80	-27	235	240		2	1	0
6302	PL ES 10 mm	A	0,5	o	1000	+72	-47	+90	-48	390	440		2	1	+1
6303	PL ES 10 mm	A	0,5	o	1200	+75	-56	+95	-62	595	670		2-3	1-2	0
6304	PL ES 10 mm	A	0,5	o	1400	+75	-60	+97	-70	700	820		3	2	0
6305	PL ES 10 mm	A	0,67	o	800	+75	-28	+90	-30	275	320		1-2	1-2	0
6306	PL ES 10 mm	A	0,67	o	1000	+78	-37	+90	-60	550	600		1-2	1-2	+1
6307	PL ES 10 mm	A	0,67	o	1200	+80	-40	+95	-65	680	750		1-2	1-2	0
6308	PL ES 10 mm	A	0,67	o	1400	+80	-50	+95	-70	760	820		1-2	2	0
6309	PL ES 10 mm	A	0,83	o	800	+72	-5	+80	-8	190	270		1	1	0
6310	PL ES 10 mm	A	0,83	o	1000	+80	-10	+85	-27	340	400		1	1	0
6311	PL ES 10 mm	A	0,83	o	1200	+80	-15	+90	-40	430	520		1	1-2	0
6312		A	0,5	o	800	+70	-15	+25	-8	590	620		2	1-2	0
6313		A	0,5	o	1000	+70	-21	+50	-14	865	925		2	2	0
6314		A	0,5	o	1200	+70	-26	+85	-22	1160	1200		2	2	+1
6315		A	0,5	o	1400	+75	-27	+90	-25	1320	1340		2	3	0
6316		A	0,67	o	800	+75	-20	+45	-13	650	660		1	1-2	0
6317		A	0,67	o	1000	+75	-22	+50	-20	895	900		1	2	0
6318		A	0,67	o	1200	+75	-27	+50	-20	1130	1160		1	2	-1
6319		A	0,67	o	1400	+75	-29	+50	-22	1260	1290		1-2	2-3	0
6320		A	0,83	o	800	+48	-8	+30	-12	480	490		1	2	0
6321		A	0,83	o	1000	+50	-10	+31	-13	570	590		1	2-3	0

6322		A	0,83	o	1200	+51	-11	+30	-12	715	720		1	3	+1
6323	PL ES 10 mm	C	0,5	o	800	+75	-55	+80	-65	270	270		1-2	1	0
6324	PL ES 10 mm	C	0,5	o	1000	+78	-57	+85	-70	590	620		1-2	1-2	0
6325	PL ES 10 mm	C	0,5	o	1200	+78	-65	+88	-82	825	875		2	2	-1
6326	PL ES 10 mm	C	0,5	o	1400	+78	-70	+90	-90	990	1000		2	2-3	0
6327	PL ES 10 mm	C	0,67	o	800	+77	-40	+85	-60	415	420		1	1	0
6328	PL ES 10 mm	C	0,67	o	1000	+82	-50	+85	-70	590	600		1	2	0
6329	PL ES 10 mm	C	0,67	o	1200	+85	-60	+85	-75	760	790		1	2	-1
6330	PL ES 10 mm	C	0,67	o	1400	+85	-65	+90	-80	910	925		1	2-3	0
6331	PL ES 10 mm	C	0,83	o	800	+80	-35	+90	-40	190	210		1	1-2	0
6332	PL ES 10 mm	C	0,83	o	1000	+80	-42	+90	-65	345	425		1	2	0
6333	PL ES 10 mm	C	0,83	o	1200	+80	-65	+95	-70	470	530		1	2	+1
6334		C	0,5	o	800	+82	-40	+32	-12	830	860		1-2	1-2	0
6335		C	0,5	o	1000	+85	-47	+50	-30	1220	1330		1-2	2	0
6336		C	0,5	o	1200	+85	-67	+52	-34	1410	1470		2	2-3	0
6337		C	0,5	o	1400	+85	-70	+65	-36	1570	1650		2	3	0
6338		C	0,67	o	800	+80	-38	+42	-17	865	925		1	1-2	0
6339		C	0,67	o	1000	+80	-46	+50	-20	1130	1160		1	2	0
6340		C	0,67	o	1200	+85	-65	+39	-24	1360	1380		1	2-3	+1
6341		C	0,67	o	1400	+85	-77	+35	-34	1420	1500		1	3	0
6342		C	0,83	o	800	+80	-25	+27	-13	595	610		1	2	0
6343		C	0,83	o	1000	+85	-38	+30	-13	745	770		1	3	0
6344		C	0,83	o	1200	+85	-45	+22	-13	880	910		1	3	-1
6345		A	0,5	o	800	+65	-11	+25	-7	583	625		2	1-2	0
6346		A	0,5	o	1000	+75	-13	+29	-10	745	790		2-3	1-2	-1
6347		A	0,5	o	1200	+85	-12	+30	-13	873	930		3	1-2	0
6348		A	0,5	o	1400	+90	-11	+30	-15	940	1010		3	1-2	0
6349		A	0,67	o	800	+55	-6	+25	-7	540	560		1	1-2	0
6350		A	0,67	o	1000	+60	-10	+25	-8	680	730		1	1-2	0
6351		A	0,67	o	1200	+65	-15	+25	-12	795	840		1-2	1-2	0
6352		A	0,67	o	1400	+68	-15	+23	-13	880	920		1-2	2	+1

6353		A	0,83	o	800	+25	+1	+13	-6	370	390		1	1-2	0
6354		A	0,83	o	1000	+25	+2	+20	-9	495	485		1	1-2	0
6355		A	0,83	o	1200	+40	-10	+18	-20	590	640		1	1-2	0
6356	PL ES 10 mm	A	0,5	o	800	+75	-25	+90	-25	180	230		1-2	1	0
6357	PL ES 10 mm	A	0,5	o	1000	+80	-40	+90	-45	330	365		2	1	0
6358	PL ES 10 mm	A	0,5	o	1200	+80	-35	+90	-55	410	495		2	1	+1
6359	PL ES 10 mm	A	0,5	o	1400	+80	-40	+90	-50	560	565		2-3	1	-1
6360	PL ES 10 mm	A	0,67	o	800	+80	-24	+90	-25	180	230		1	1	0
6361	PL ES 10 mm	A	0,67	o	1000	+80	-35	+90	-45	255	360		1	1	0
6362	PL ES 10 mm	A	0,67	o	1200	+80	-40	+90	-50	395	445		1-2	1	0
6363	PL ES 10 mm	A	0,67	o	1400	+85	-45	+95	-50	485	560		1-2	1	0
6364	PL ES 10 mm	A	0,83	o	800	+45	-35	+30	-30	150	235		1	1	0
6365	PL ES 10 mm	A	0,83	o	1000	+50	-30	+35	-30	180	300		1	1	0
6366	PL ES 10 mm	A	0,83	o	1200	+65	-35	+45	-45	260	360		1	1	0
6367		A	0,5	o	800	+40	-6	+40	-6	275	340		2-3	2	0
6368		A	0,5	o	1000	+40	-8	+40	-10	470	480		3	2	-1
6369		A	0,5	o	1200	+45	-11	+50	-12	570	595		3-4	2-3	0
6370		A	0,5	o	1400	+45	-13	+50	-13	658	640		3-4	2	0
6371		A	0,67	o	800	+45	-5	+40	-3	410	400		1	1-2	0
6372		A	0,67	o	1000	+50	-5	+53	-7	500	423		2-3	2	0
6373		A	0,67	o	1200	+55	-8	+55	-8	560	490		2-3	2	0
6374		A	0,67	o	1400	+50	-8	+55	-11	650	615		3-4	2-3	0
6375		A	0,83	o	800	+23	-1	+28	-1	345	320		1	1-2	0
6376		A	0,83	o	1000	+28	-1	+33	-3	403	350		1	1-2	0
6377		A	0,83	o	1200	+35	-1	+40	-1	530	465		1-2	1-2	0
6378	FK ES 15 mm	A	0,5	o	800	+80	-7	+50	-10	35			1-2	1	0
6379	FK ES 15 mm	A	0,5	o	1000	+95	-11	+80	-15	40			1-2	1	0
6380	FK ES 15 mm	A	0,5	o	1200	+95	-11	+90	-25	40			2-3	1-2	0
6381	FK ES 15 mm	A	0,5	o	1400	+95	-11	+95	-30	45			3	2	0
6382	FK ES 15 mm	A	0,67	o	800	+80	+7	+70	+6	30			1-2	1-2	-1
6383	FK ES 15 mm	A	0,67	o	1000	+95	+5	+80	-8	65			1-2	1-2	0

6384	FK ES 15 mm	A	0,67	o	1200	+95	+5	+95	-20	85			1	1-2	0
6385	FK ES 15 mm	A	0,67	o	1400	+95	-3	+90	-15	90			1-2	1-2	0
6386	FK ES 15 mm	A	0,83	o	800	+90	+22	+65	+22	25			1	1-2	0
6387	FK ES 15 mm	A	0,83	o	1000	+95	+15	+85	+15	90			1	1-2	0
6388	FK ES 15 mm	A	0,83	o	1200	+95	-15	+95	-15	85			1	2	0
6389		A	0,5	o	800	+80	-10	+60	-4	440	450		2	1-2	0
6390		A	0,5	o	1000	+80	-15	+65	-10	670	660		2-3	2	0
6391		A	0,5	o	1200	+80	-13	+65	-11	835	820		3	2	0
6392		A	0,5	o	1400	+80	-15	+65	-18	995	950		3	2-3	0
6393		A	0,67	o	800	+80	-9	+55	-9	440	450		1-2	1-2	0
6394		A	0,67	o	1000	+80	-12	+60	-14	625	640		2	1-2	0
6395		A	0,67	o	1200	+80	-10	+60	-16	690	710		2	1-2	0
6396		A	0,67	o	1400	+80	-13	+65	-20	760	740		2	2-3	0
6397		A	0,83	o	800	+60	0	+50	-8	320	330		1	2	0
6398		A	0,83	o	1000	+55	+2	+50	-5	418	445		1	2	0
6399		A	0,83	o	1200	+55	+15	+50	-8	540	580		1	2-3	0

7.8.1.3 Systeme n-Butanol + Wasser + NaCl

Versuchs-Nr.	Einbau	LB	α	Dispersions- richtung	Volumen- strom	Stauhöhe oben	Stauhöhe unten	Keilhöhe o- ben	Keilhöhe un- ten	Wand- ablösung	Keilende	Bandhöhe	Trübe o	Trübe w	Trenn- spiegelage
					l/h	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	-	-	mm
7001		A	0,17	w	400	+21	-14	+5	-3			2	2	3-4	-1
7002		A	0,17	w	600	+47	-10	+25	0			2	2	4	+3
7003		A	0,17	w	800	+47	-16	+35	0			2	3	3	-1
7004		A	0,17	w	1000	+50	-17	+47	0			2	3	3-4	0
7005		A	0,25	w	400	+19	-14	+5	-4			2	2	1	-1
7006		A	0,25	w	600	+40	-17	+18	-4			2	3	2	0
7007		A	0,25	w	800	+45	-21	+24	-5			2	2	3-4	-2
7008		A	0,25	w	1000	+51	-23	+28	-5			3	2	3-4	-1
7009		A	0,5	o	400	+28	-10	+7	-4	680	800		2	1	-2
7010		A	0,5	o	600	+34	-12	+13	-4	890	1100		2	1	+2
7011		A	0,5	o	800	+42	-19	+15	-10	1150	1450		2-3	1	+1
7012		A	0,5	o	1000	+49	-25	+18	-13	1200	1560		2-3	1	+1
7013		A	0,75	o	400	+20	-10	+5	-4	550	650		2	2	0
7014		A	0,75	o	600	+23	-20	+9	-5	610	900		2	3	+2
7015		A	0,75	o	800	+25	-30	+8	-12	830	1150		2-3	3-4	0
7016		A	0,75	o	1000	+26	-50	+9	-20	1100	1350		3	4	0
7017	PL ES 10 mm	A	0,17	w	400	+21	-19	+25	-12	190	750		2	1	0
7018	PL ES 10 mm	A	0,17	w	600	+38	-21	+45	-19	360	550		2	3-4	0
7019	PL ES 10 mm	A	0,17	w	800	+46	-28	+70	-12	590	700		2	3-4	-1
7020	PL ES 10 mm	A	0,17	w	1000	+63	-30	+70	-14	590	200		3	3	-1
7021	PL ES 10 mm	A	0,25	w	400	+13	-21	+9	-14	250	550		1	1-2	0

7022	PL ES 10 mm	A	0,25	w	600	+37	-25	+14	-13	360	600		1	1-2	0
7023	PL ES 10 mm	A	0,25	w	800	+45	-28	+27	-19	440	770		1	1-2	0
7024	PL ES 10 mm	A	0,25	w	1000	+50	-35	+35	-21	520	770		1	1-2	0
7025	PL ES 10 mm	A	0,5	o	400	+27	-16	+16	-10	190	370		1-2	1-2	0
7026	PL ES 10 mm	A	0,5	o	600	+35	-25	+21	-16	360	610		2	1-2	0
7027	PL ES 10 mm	A	0,5	o	800	+42	-32	+28	-23	510	810		2	1-2	0
7028	PL ES 10 mm	A	0,5	o	1000	+54	-39	+29	-33	600	1000		2-3	1	0
7029	PL ES 10 mm	A	0,75	o	400	+19	-8	+14	-10	120	330		1-2	2-3	0
7030	PL ES 10 mm	A	0,75	o	600	+23	-27	+11	-16	280	400		1-2	2-3	0
7031	PL ES 10 mm	A	0,75	o	800	+27	-44	+13	-25	360	500		2	3	0
7032	PL ES 10 mm	A	0,75	o	1000	+33	-50	+18	-40	440	590		2	3	0
7033		A	0,17	w	400	+21	-19	+4	-2			2	2	3	0
7034		A	0,17	w	600	+34	-19	+22	-2			2	2	3	0
7035		A	0,17	w	800	+35	-15	+30	-2			3	3	3	-1
7036		A	0,17	w	1000	+43	-19	+37	-4			6-7	3	3-4	-1
7037		A	0,25	w	400	+21	-16	+61	-4			2	1	4	-1
7038		A	0,25	w	600	+34	-18	+16	-4			3	1-2	4	-1
7039		A	0,25	w	800	+48	-20	+29	-4			4	2	3	0
7040		A	0,25	w	1000	+50	-20	+94	-6			4	2	3	0
7041		A	0,5	o	400	+28	-10	+91	-2	560	760		2	1	0
7042		A	0,5	o	600	+34	-15	+11	-5	880	1090		2-3	1	0
7043		A	0,5	o	800	+40	-23	+11	-10	1150	1300		2-3	1	-1
7044		A	0,5	o	1000	+50	-27	+17	-12	1200	1500		2-3	1	0
7045		A	0,75	o	400	+21	-13	+6	0	410	550		1-2	2-3	0
7046		A	0,75	o	600	+22	-25	+8	-10	580	900		2	3-4	0
7047		A	0,75	o	800	+25	-35	+8	-15	800	1150		2-3	4	0
7048		A	0,75	o	1000	+27	-45	+10	-27	1010	1350		3	4	0
7049	PL PP 10 mm	A	0,17	w	400	+20	-18	+13	-15	270	340		1-2	2-3	0
7050	PL PP 10 mm	A	0,17	w	600	+30	-23	+29	-15	270	350		1	2-3	0
7051	PL PP 10 mm	A	0,17	w	800	+50	-36	+38	-18	350	420		2	3	+0,5
7052	PL PP 10 mm	A	0,17	w	1000	+58	-31	+47	-36	350	680		2-3	3	0

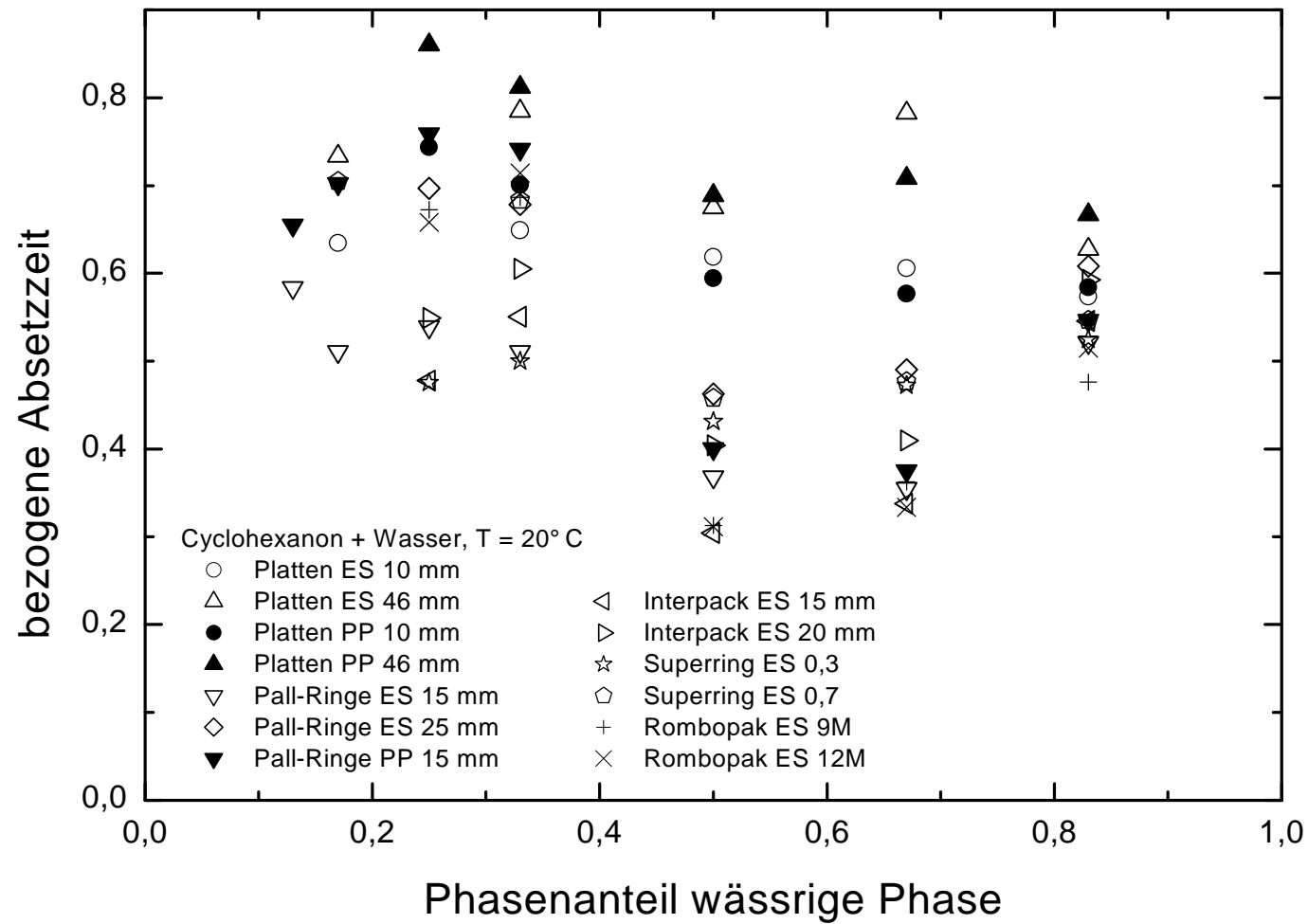
7053	PL PP 10 mm	A	0,25	w	400	+15	-23	+12	-17	370	360		1	4	0
7054	PL PP 10 mm	A	0,25	w	600	+35	-28	+21	-20	350	400		1	3	0
7055	PL PP 10 mm	A	0,25	w	800	+41	-33	+35	-30	430	510		1	3	0
7056	PL PP 10 mm	A	0,25	w	1000	+51	-35	+46	-30	430	650		2	3	-1
7057	PL PP 10 mm	A	0,5	o	400	+28	-16	+15	-10	195	620		2-3	1	0
7058	PL PP 10 mm	A	0,5	o	600	+35	-25	+20	-15	350	750		2-3	1	0
7059	PL PP 10 mm	A	0,5	o	800	+40	-30	+26	-22	510	910		3	1	-1
7060	PL PP 10 mm	A	0,5	o	1000	+51	-37	+29	-28	595	1100		3	1	0
7061	PL PP 10 mm	A	0,75	o	400	+19	-11	+10	-9	110	400		2	2-3	0
7062	PL PP 10 mm	A	0,75	o	600	+25	-28	+11	-18	190	450		2	2-3	0
7063	PL PP 10 mm	A	0,75	o	800	+28	-45	+12	-30	275	550		2-3	3-4	0
7064	PL PP 10 mm	A	0,75	o	1000	+31	-50	+14	-35	355	630		2-3	3-4	0
7065	FK ES 15mm	A	0,17	w	400	+10	-35	+15	-30	110			1	3	+1
7066	FK ES 15mm	A	0,17	w	600	+31	-46	+35	-46	200			1	2-3	0
7067	FK ES 15mm	A	0,17	w	800	+39	-65	+46	-52	230			1-2	2-3	0
7068	FK ES 15mm	A	0,17	w	1000	+60	-70	+67	-65	270			1-2	2	0
7069	FK ES 15mm	A	0,25	w	400	+13	-45	+11	-36	135			1	3-4	0
7070	FK ES 15mm	A	0,25	w	600	+28	-55	+23	-50	220			1	3	0
7071	FK ES 15mm	A	0,25	w	800	+40	-60	+33	-65	250			1	2-3	0
7072	FK ES 15mm	A	0,25	w	1000	+55	-70	+50	-75	300			1	2-3	0
7073	FK ES 15mm	A	0,5	o	400	+50	-20	+41	-22	145			1-2	3	0
7074	FK ES 15mm	A	0,5	o	600	+55	-38	+55	-32	215			1-2	3	0
7075	FK ES 15mm	A	0,5	o	800	+65	-55	+57	-50	310			1	2-3	0
7076	FK ES 15mm	A	0,5	o	1000	+75	-61	+70	-60	380			1	2	0
7077	FK ES 15mm	A	0,75	o	400	+40	-10	+35	-15	80			1	3-4	0
7078	FK ES 15mm	A	0,75	o	600	+55	-25	+40	-25	165			1	3-4	-1
7079	FK ES 15mm	A	0,75	o	800	+60	-45	+60	-48	255			1	4	0
7080	FK ES 15mm	A	0,75	o	1000	+75	-50	+61	-50	330			1	3-4	0
7081		A	0,17	w	400	+25	-15	+6	-4			2	2	1-2	0
7082		A	0,17	w	600	+45	-15	+16	-4			2	2-3	1	0
7083		A	0,17	w	800	+56	-16	+22	-4			6	2-3	1	-1

7084		A	0,17	w	1000	+55	-20	+24	-4			9	3-4	1-2	-1
7085		A	0,25	w	400	+22	-17	+8	-4			2	2	3	0
7086		A	0,25	w	600	+40	-18	+17	-5			3	1-2	3	0
7087		A	0,25	w	800	+46	-21	+25	-4			55	2	3	0
7088		A	0,25	w	1000	+52	-23	+33	-3			8	3	4	0
7089		A	0,17	w	400	+24	-15	+6	-2			2	2	4	0
7090		A	0,17	w	600	+41	-16	+21	-4			2	2	4	0
7091		A	0,17	w	800	+46	-16	+35	-3			2	3	4	0
7092		A	0,17	w	1000	+49	-17	+42	-3			4	3-4	4	0
7093		A	0,25	w	400	+21	-16	+7	-4			2	1-2	4	0
7094		A	0,25	w	600	+40	-20	+18	-5			2	1-2	4	0
7095		A	0,25	w	800	+42	-21	+25	-4			3	1-2	3-4	0
7096		A	0,25	w	1000	+54	-22	+36	-5			4	2	3-4	0
7097		A	0,5	o	400	+28	-10	+9	-3	550	800		2	1	-1
7098		A	0,5	o	600	+31	-16	+10	-5	800	110		2	1	0
7099		A	0,5	o	800	+44	-22	+13	-10	1210	1490		2	1	0
7100		A	0,5	o	1000	+50	-30	+16	-15	1210	1600		3	1	0
7101		A	0,75	o	400	+24	-10	+8	-0	390	520		1-2	2	0
7102		A	0,75	o	600	+23	-20	+9	-8	550	1000		1-2	2-3	0
7103		A	0,75	o	800	+24	-35	+8	-18	800	1150		2	3-4	0
7104		A	0,75	o	1000	+26	-45	+9	-20	1020	1350		2-3	4	0
7105	FK PP 15mm	A	0,17	w	400	+18	-27	+17	-27	150	150		1	4-5	0
7106	FK PP 15mm	A	0,17	w	600	+42	-40	+40	-40	250	300		1	3-4	0
7107	FK PP 15mm	A	0,17	w	800	+51	-47	+51	-47	330	360		1-2	3	-1
7108	FK PP 15mm	A	0,17	w	1000	+67	-60	+64	-55	420	470		1-2	2-3	0
7109	FK PP 15mm	A	0,25	w	400	+22	-40	+24	-41	210	210		1	2-3	0
7110	FK PP 15mm	A	0,25	w	600	+43	-60	+42	-55	310	370		1	3-4	0
7111	FK PP 15mm	A	0,25	w	800	+60	-70	+55	-68	440	480		1	3-4	0
7112	FK PP 15mm	A	0,25	w	1000	+70	-75	+72	-25	560	580		1	3-4	0
7113	FK PP 15mm	A	0,5	o	400	+35	-18	+23	-18	160	160		1	1-2	-1
7114	FK PP 15mm	A	0,5	o	600	+40	-30	+30	-25	220	250		1	1-2	0

7115	FK PP 15mm	A	0,5	o	800	+55	-42	+40	-50	220	350		1	1	0
7116	FK PP 15mm	A	0,5	o	1000	+65	-60	+45	-65	330	400		1	1	0
7117	FK PP 15mm	A	0,75	o	400	+28	-10	+18	-15	140	180		1	2-3	0
7118	FK PP 15mm	A	0,75	o	600	+35	-40	+22	-30	190	220		1	3	0
7119	FK PP 15mm	A	0,75	o	800	+40	-42	+35	-45	250	300		1	3	0
7120	FK PP 15mm	A	0,75	o	1000	+54	-55	+45	-55	310	330		1	3	0

7.8.2 Absetzversuche in der Rührzelle

7.8.2.1 System Cyclohexanon + Wasser



Versuchs-Nr.	Einbau	α	Dispersions- richtung	Absetzversuch Mixer			Absetzversuch Settler		
				h_W	h_{ges}	t_E	h_W	h_{ges}	t_E
				mm	mm	s	mm	mm	s
AV01.01	Platten ES 10 mm	0,5	o	115	225	50	130	230	31
AV01.02	Platten ES 10 mm	0,5	o	115	225	51	130	230	31
AV01.03	Platten ES 10 mm	0,5	o	115	227	51	130	231	32
AV01.04	Platten ES 10 mm	0,67	o	155	227	48	175	231	28
AV01.05	Platten ES 10 mm	0,67	o	147	220	47	170	227	29
AV01.06	Platten ES 10 mm	0,67	o	147	220	47	170	225	29
AV01.07	Platten ES 10 mm	0,33	w	75	230	38	75	235	24
AV01.08	Platten ES 10 mm	0,33	w	75	230	38	70	232	25
AV01.09	Platten ES 10 mm	0,33	w	75	220	38	70	220	25
AV01.10	Platten ES 10 mm	0,17	w	40	215	41	25	220	23
AV01.11	Platten ES 10 mm	0,17	w	30	215	36	20	220	24
AV01.12	Platten ES 10 mm	0,17	w	30	220	37	20	220	25
AV01.13	Platten ES 10 mm	0,83	w	190	225	45	213	220	26
AV01.14	Platten ES 10 mm	0,83	w	180	218	45	210	222	27
AV01.15	Platten ES 10 mm	0,83	w	185	220	46	217	225	25
AV03.01	Platten ES 46 mm	0,5	o	122	244	53	115	228	36
AV03.02	Platten ES 46 mm	0,5	o	123	245	55	114	228	36
AV03.03	Platten ES 46 mm	0,5	o	123	243	55	118	229	38
AV03.04	Platten ES 46 mm	0,67	o	167	240	54	162	232	41
AV03.05	Platten ES 46 mm	0,67	o	165	245	53	160	230	42
AV03.06	Platten ES 46 mm	0,67	o	168	245	54	160	230	43
AV03.07	Platten ES 46 mm	0,33	w	75	240	44	68	220	31
AV03.08	Platten ES 46 mm	0,33	w	75	240	40	70	221	33
AV03.09	Platten ES 46 mm	0,33	w	75	240	40	70	221	33
AV03.10	Platten ES 46 mm	0,17	w	35	235	42	29	220	32
AV03.11	Platten ES 46 mm	0,17	w	35	238	41	30	220	29
AV03.12	Platten ES 46 mm	0,17	w	35	233	40	30	219	30
AV03.13	Platten ES 46 mm	0,17	w	35	240	42	30	219	30

AV03.14	Platten ES 46 mm	0,83	o	199	235	48	186	216	30
AV03.15	Platten ES 46 mm	0,83	o	200	235	49	190	219	31
AV03.16	Platten ES 46 mm	0,83	o	204	237	48	191	221	30
AV04.01	Platten PP 10 mm	0,5	o	110	223	54	118	230	30
AV04.02	Platten PP 10 mm	0,5	o	110	221	51	118	229	31
AV04.03	Platten PP 10 mm	0,5	o	111	223	50	120	230	31
AV04.04	Platten PP 10 mm	0,67	o	150	225	49	164	230	27
AV04.05	Platten PP 10 mm	0,67	o	150	223	49	166	230	28
AV04.06	Platten PP 10 mm	0,67	o	150	224	51	165	230	31
AV04.07	Platten PP 10 mm	0,83	o	180	215	46	190	225	26
AV04.08	Platten PP 10 mm	0,83	o	180	215	46	200	228	27
AV04.09	Platten PP 10 mm	0,83	o	190	225	45	200	230	27
AV04.10	Platten PP 10 mm	0,33	w	72	225	39	80	230	27
AV04.11	Platten PP 10 mm	0,33	w	72	225	39	79	230	28
AV04.12	Platten PP 10 mm	0,33	w	72	225	39	80	232	27
AV04.13	Platten PP 10 mm	0,25	w	53	225	39	55	230	28
AV04.14	Platten PP 10 mm	0,25	w	54	225	39	55	230	29
AV04.15	Platten PP 10 mm	0,25	w	53	226	39	55	230	30
AV05.01	Platten PP 46 mm	0,5	o	120	242	57	114	228	38
AV05.02	Platten PP 46 mm	0,5	o	120	243	55	114	228	39
AV05.03	Platten PP 46 mm	0,5	o	121	244	55	115	230	38
AV05.04	Platten PP 46 mm	0,67	o	165	245	54	156	229	37
AV05.05	Platten PP 46 mm	0,67	o	167	245	53	156	229	39
AV05.06	Platten PP 46 mm	0,67	o	167	245	54	157	229	38
AV05.07	Platten PP 46 mm	0,83	o	205	244	54	193	229	35
AV05.08	Platten PP 46 mm	0,83	o	205	244	55	193	229	37
AV05.09	Platten PP 46 mm	0,83	o	206	245	53	195	229	36
AV05.10	Platten PP 46 mm	0,33	w	79	244	41	72	228	32
AV05.11	Platten PP 46 mm	0,33	w	77	245	41	74	229	33
AV05.12	Platten PP 46 mm	0,33	w	75	242	40	74	229	34
AV05.13	Platten PP 46 mm	0,25	w	59	244	42	52	228	40

AV05.14	Platten PP 46 mm	0,25	w	60	244	42	53	229	34
AV05.15	Platten PP 46 mm	0,25	w	59	244	44	53	229	36
AV06.01	Pall-Ringe ES 15 mm	0,5	o	122	242	50	125	228	17
AV06.02	Pall-Ringe ES 15 mm	0,5	o	123	245	51	125	230	20
AV06.03	Pall-Ringe ES 15 mm	0,5	o	125	245	51	125	230	19
AV06.04	Pall-Ringe ES 15 mm	0,67	o	166	245	48	165	230	16
AV06.05	Pall-Ringe ES 15 mm	0,67	o	167	245	47	166	230	17
AV06.06	Pall-Ringe ES 15 mm	0,67	o	165	245	46	165	230	17
AV06.07	Pall-Ringe ES 15 mm	0,33	w	79	245	39	75	230	16
AV06.08	Pall-Ringe ES 15 mm	0,33	w	79	244	38	75	230	21
AV06.09	Pall-Ringe ES 15 mm	0,33	w	78	245	38	75	230	22
AV06.10	Pall-Ringe ES 15 mm	0,33	w	77	246	41	73	231	21
AV06.11	Pall-Ringe ES 15 mm	0,33	w	78	246	40	76	231	20
AV06.12	Pall-Ringe ES 15 mm	0,25	w	58	247	39	53	232	21
AV06.13	Pall-Ringe ES 15 mm	0,25	w	60	248	39	56	232	21
AV06.14	Pall-Ringe ES 15 mm	0,25	w	59	246	37	56	232	20
AV06.15	Pall-Ringe ES 15 mm	0,83	o	207	247	47	-	-	22
AV06.16	Pall-Ringe ES 15 mm	0,83	o	209	247	47	212	232	25
AV06.17	Pall-Ringe ES 15 mm	0,83	o	210	248	47	212	235	26
AV06.18	Pall-Ringe ES 15 mm	0,83	o	205	245	47	210	230	25
AV06.19	Pall-Ringe ES 15 mm	0,17	w	38	245	38	25	229	16
AV06.20	Pall-Ringe ES 15 mm	0,17	w	39	243	37	27	230	16
AV06.21	Pall-Ringe ES 15 mm	0,17	w	39	243	39	25	230	21
AV06.22	Pall-Ringe ES 15 mm	0,17	w	39	243	37	25	230	22
AV06.23	Pall-Ringe ES 15 mm	0,17	w	39	244	37	24	230	21
AV06.24	Pall-Ringe ES 15 mm	0,13	w	30	243	41	20	230	23
AV06.25	Pall-Ringe ES 15 mm	0,13	w	29	243	40	20	229	23
AV06.26	Pall-Ringe ES 15 mm	0,13	w	29	244	39	20	229	24
AV07.01	Pall-Ringe PP 15 mm	0,5	o	115	230	52	115	218	21
AV07.02	Pall-Ringe PP 15 mm	0,5	o	115	231	53	114	223	22
AV07.03	Pall-Ringe PP 15 mm	0,5	o	117	231	52	116	220	23

AV07.04	Pall-Ringe PP 15 mm	0,5	o	118	229	52	115	218	22
AV07.05	Pall-Ringe PP 15 mm	0,5	o	111	234	67	110	225	21
AV07.06	Pall-Ringe PP 15 mm	0,5	o	116	234	59	120	225	23
AV07.07	Pall-Ringe PP 15 mm	0,5	o	119	235	58	119	226	24
AV07.08	Pall-Ringe PP 15 mm	0,67	o	155	230	51	155	222	19
AV07.09	Pall-Ringe PP 15 mm	0,67	o	155	230	52	155	222	22
AV07.10	Pall-Ringe PP 15 mm	0,67	o	155	230	52	155	220	20
AV07.11	Pall-Ringe PP 15 mm	0,67	o	154	235	72	155	228	23
AV07.12	Pall-Ringe PP 15 mm	0,33	w	80	234	39	80	223	32
AV07.13	Pall-Ringe PP 15 mm	0,33	w	79	235	40	78	224	28
AV07.14	Pall-Ringe PP 15 mm	0,33	w	84	238	40	81	226	29
AV07.15	Pall-Ringe PP 15 mm	0,33	w	76	235	43	76	226	30
AV07.16	Pall-Ringe PP 15 mm	0,33	w	75	234	42	79	225	31
AV07.17	Pall-Ringe PP 15 mm	0,33	w	75	235	43	77	226	33
AV07.18	Pall-Ringe PP 15 mm	0,25	w	53	235	31	54	224	26
AV07.19	Pall-Ringe PP 15 mm	0,25	w	55	235	32	55	225	26
AV07.20	Pall-Ringe PP 15 mm	0,25	w	55	235	37	55	225	27
AV07.21	Pall-Ringe PP 15 mm	0,25	w	55	235	36	55	225	26
AV07.22	Pall-Ringe PP 15 mm	0,25	w	55	234	42	55	226	29
AV07.23	Pall-Ringe PP 15 mm	0,83	o	196	235	45	199	225	29
AV07.24	Pall-Ringe PP 15 mm	0,83	o	197	235	46	199	225	23
AV07.25	Pall-Ringe PP 15 mm	0,83	o	196	235	44	199	225	22
AV07.26	Pall-Ringe PP 15 mm	0,83	o	197	235	43	199	226	25
AV07.27	Pall-Ringe PP 15 mm	0,83	o	196	234	44	197	225	30
AV07.28	Pall-Ringe PP 15 mm	0,83	o	200	236	62	205	228	23
AV07.29	Pall-Ringe PP 15 mm	0,17	w	36	234	41	36	226	29
AV07.30	Pall-Ringe PP 15 mm	0,17	w	37	234	42	35	226	27
AV07.31	Pall-Ringe PP 15 mm	0,17	w	35	235	41	35	226	31
AV07.32	Pall-Ringe PP 15 mm	0,13	w	24	233	45	26	225	31
AV07.33	Pall-Ringe PP 15 mm	0,13	w	24	234	46	26	224	28
AV07.34	Pall-Ringe PP 15 mm	0,13	w	25	235	45	25	225	30

AV08.01	Pall-Ringe ES 25 mm	0,5	o	124	247	61	120	229	28
AV08.02	Pall-Ringe ES 25 mm	0,5	o	125	247	56	120	228	25
AV08.03	Pall-Ringe ES 25 mm	0,5	o	124	247	56	120	229	27
AV08.04	Pall-Ringe ES 25 mm	0,67	o	170	248	53	160	230	27
AV08.05	Pall-Ringe ES 25 mm	0,67	o	168	248	52	161	230	24
AV08.06	Pall-Ringe ES 25 mm	0,67	o	167	247	52	160	230	26
AV08.07	Pall-Ringe ES 25 mm	0,33	w	80	248	47	78	230	29
AV08.08	Pall-Ringe ES 25 mm	0,33	w	80	248	43	77	229	31
AV08.09	Pall-Ringe ES 25 mm	0,33	w	80	249	43	77	230	30
AV08.10	Pall-Ringe ES 25 mm	0,25	w	58	250	41	55	232	27
AV08.11	Pall-Ringe ES 25 mm	0,25	w	60	251	40	56	233	29
AV08.12	Pall-Ringe ES 25 mm	0,25	w	68	249	41	54	230	29
AV08.13	Pall-Ringe ES 25 mm	0,83	o	215	258	47	207	238	28
AV08.14	Pall-Ringe ES 25 mm	0,83	o	214	253	48	206	235	30
AV08.15	Pall-Ringe ES 25 mm	0,83	o	212	251	48	205	233	29
AV09.01	Interpak ES 15 mm	0,5	o	118	237	53	121	227	16
AV09.02	Interpak ES 15 mm	0,5	o	120	240	54	126	230	16
AV09.03	Interpak ES 15 mm	0,5	o	120	240	54	126	230	17
AV09.04	Interpak ES 15 mm	0,67	o	164	242	53	167	233	18
AV09.05	Interpak ES 15 mm	0,67	o	163	240	54	168	230	18
AV09.06	Interpak ES 15 mm	0,67	o	161	240	53	167	230	18
AV09.07	Interpak ES 15 mm	0,83	o	203	240	51	210	232	34
AV09.08	Interpak ES 15 mm	0,83	o	204	240	49	210	232	19
AV09.09	Interpak ES 15 mm	0,83	o	201	240	51	211	232	30
AV09.10	Interpak ES 15 mm	0,83	o	202	240	50	212	230	27
AV09.11	Interpak ES 15 mm	0,33	w	79	241	44	68	232	27
AV09.12	Interpak ES 15 mm	0,33	w	77	242	38	67	230	21
AV09.13	Interpak ES 15 mm	0,33	w	76	241	42	68	231	22
AV09.14	Interpak ES 15 mm	0,33	w	78	243	43	71	233	22
AV09.15	Interpak ES 15 mm	0,25	w	57	242	44	48	232	21
AV09.16	Interpak ES 15 mm	0,25	w	57	239	45	47	233	20

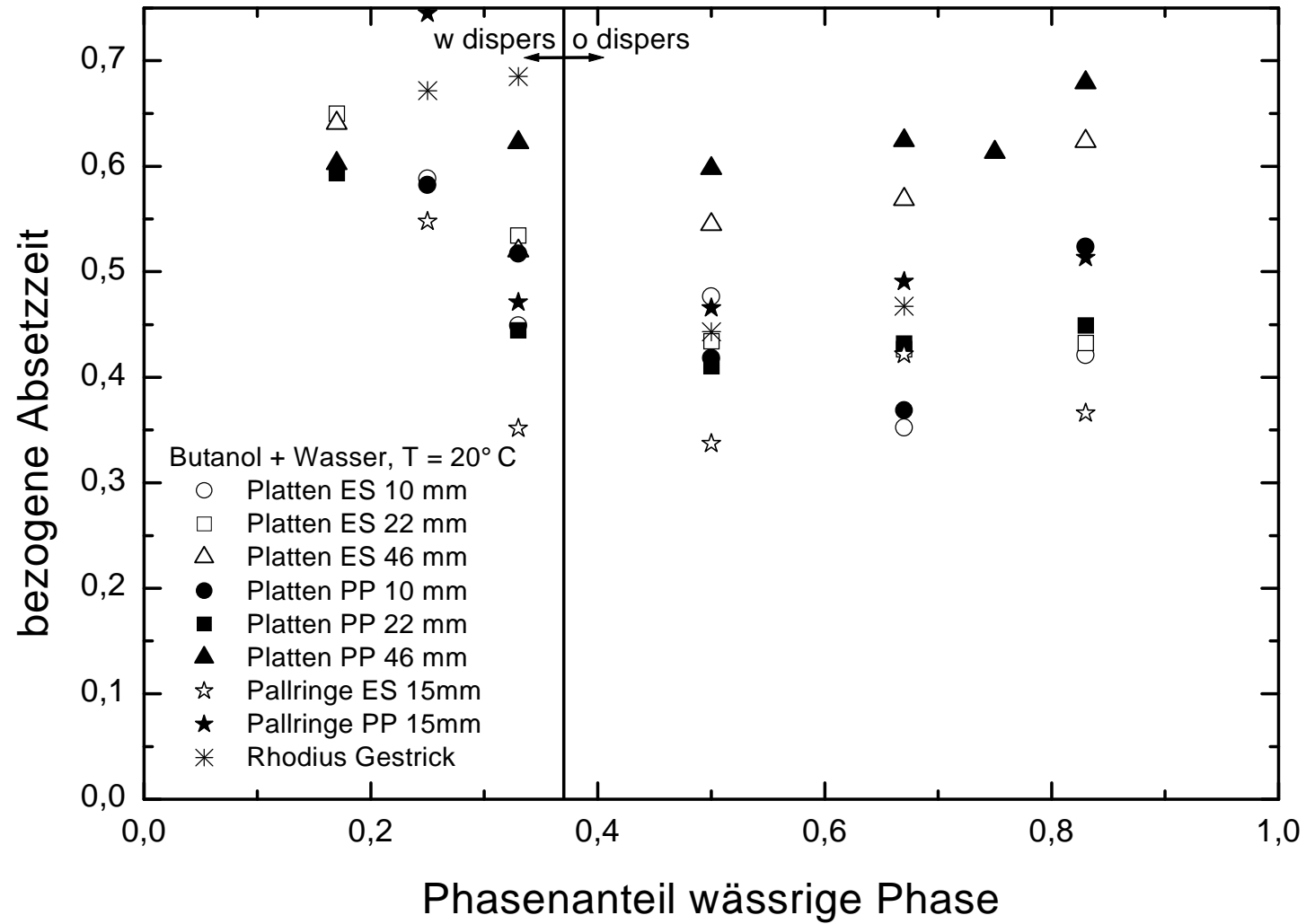
AV09.17	Interpak ES 15 mm	0,25	w	57	244	43	49	234	22
AV10.01	Interpak ES 20 mm	0,5	o	121	240	51	119	225	20
AV10.02	Interpak ES 20 mm	0,5	o	121	240	50	119	225	20
AV10.03	Interpak ES 20 mm	0,5	o	121	240	50	119	225	21
AV10.04	Interpak ES 20 mm	0,67	o	164	240	48	163	229	19
AV10.05	Interpak ES 20 mm	0,67	o	165	240	47	162	229	20
AV10.06	Interpak ES 20 mm	0,67	o	164	241	49	163	229	20
AV10.07	Interpak ES 20 mm	0,33	w	77	240	38	71	228	23
AV10.08	Interpak ES 20 mm	0,33	w	78	240	38	72	228	23
AV10.09	Interpak ES 20 mm	0,33	w	77	240	38	73	229	23
AV10.10	Interpak ES 20 mm	0,83	o	203	240	45	202	229	26
AV10.11	Interpak ES 20 mm	0,83	o	203	239	44	203	229	27
AV10.12	Interpak ES 20 mm	0,83	o	203	240	46	204	230	27
AV10.13	Interpak ES 20 mm	0,25	w	58	244	40	53	229	22
AV10.14	Interpak ES 20 mm	0,25	w	58	243	41	52	229	22
AV10.15	Interpak ES 20 mm	0,25	w	58	241	41	53	228	23
AV11.01	Raschig Super-Ring ES 0,3	0,5	o	120	245	53	126	228	22
AV11.02	Raschig Super-Ring ES 0,3	0,5	o	125	246	54	129	230	23
AV11.03	Raschig Super-Ring ES 0,3	0,5	o	124	246	53	128	229	24
AV11.04	Raschig Super-Ring ES 0,3	0,67	o	166	245	49	169	228	22
AV11.05	Raschig Super-Ring ES 0,3	0,67	o	167	245	50	170	229	24
AV11.06	Raschig Super-Ring ES 0,3	0,67	o	167	246	51	173	229	25
AV11.07	Raschig Super-Ring ES 0,3	0,67	o	165	245	51	169	228	24
AV11.08	Raschig Super-Ring ES 0,3	0,83	o	206	245	50	207	228	26
AV11.09	Raschig Super-Ring ES 0,3	0,83	o	207	246	46	209	229	28
AV11.10	Raschig Super-Ring ES 0,3	0,83	o	207	246	51	209	229	24
AV11.11	Raschig Super-Ring ES 0,3	0,83	o	204	244	50	207	229	25
AV11.12	Raschig Super-Ring ES 0,3	0,33	w	77	245	39	63	230	20
AV11.13	Raschig Super-Ring ES 0,3	0,33	w	77	246	39	-	-	19
AV11.14	Raschig Super-Ring ES 0,3	0,33	w	77	245	38	63	228	19
AV11.15	Raschig Super-Ring ES 0,3	0,25	w	58	245	41	43	228	19

AV11.16	Raschig Super-Ring ES 0,3	0,25	w	-	-	40	42	228	19
AV11.17	Raschig Super-Ring ES 0,3	0,25	w	57	244	41	42	228	20
AV12.01	Raschig Super-Ring ES 0,7	0,5	o	122	246	52	123	224	26
AV12.02	Raschig Super-Ring ES 0,7	0,5	o	124	248	52	122	225	23
AV12.03	Raschig Super-Ring ES 0,7	0,5	o	123	245	51	123	224	22
AV12.04	Raschig Super-Ring ES 0,7	0,67	o	170	245	51	160	225	24
AV12.05	Raschig Super-Ring ES 0,7	0,67	o	170	245	49	159	225	23
AV12.06	Raschig Super-Ring ES 0,7	0,67	o	170	246	49	159	225	24
AV12.07	Raschig Super-Ring ES 0,7	0,33	w	78	251	40	68	228	27
AV12.08	Raschig Super-Ring ES 0,7	0,33	w	78	250	39	65	227	27
AV12.09	Raschig Super-Ring ES 0,7	0,33	w	79	250	40	69	226	27
AV12.10	Raschig Super-Ring ES 0,7	0,33	w	79	249	39	69	226	27
AV12.11	Raschig Super-Ring ES 0,7	0,83	o	209	249	46	195	225	25
AV12.12	Raschig Super-Ring ES 0,7	0,83	o	208	249	47	196	225	26
AV12.13	Raschig Super-Ring ES 0,7	0,83	o	209	250	46	195	225	25
AV12.14	Raschig Super-Ring ES 0,7	0,17	w	40	249	35	30	225	25
AV12.15	Raschig Super-Ring ES 0,7	0,17	w	39	249	35	29	225	25
AV12.16	Raschig Super-Ring ES 0,7	0,17	w	39	249	35	30	225	24
AV21.01	Rombopack 9M	0,5	o	130	260	54	125	235	17
AV21.02	Rombopack 9M	0,5	o	130	260	55	120	230	17
AV21.03	Rombopack 9M	0,5	o	130	260	54	120	230	17
AV21.04	Rombopack 9M	0,67	o	179	260	53	170	230	20
AV21.05	Rombopack 9M	0,67	o	177	260	53	169	230	19
AV21.06	Rombopack 9M	0,67	o	179	260	54	170	230	19
AV21.07	Rombopack 9M	0,33	w	86	260	39	80	230	27
AV21.08	Rombopack 9M	0,33	w	84	260	40	78	230	27
AV21.09	Rombopack 9M	0,33	w	85	260	39	79	230	27
AV21.10	Rombopack 9M	0,83	o	216	260	49	214	230	23
AV21.11	Rombopack 9M	0,83	o	218	260	49	214	230	24
AV21.12	Rombopack 9M	0,83	o	216	260	49	214	230	23

AV21.13	Rombopack 9M	0,25	w	67	260	40	60	230	26
AV21.14	Rombopack 9M	0,25	w	66	260	39	59	230	27
AV21.15	Rombopack 9M	0,25	w	67	260	40	59	230	27
AV21.01	Rombopack 9M	0,5	o	130	260	54	125	235	17
AV21.02	Rombopack 9M	0,5	o	130	260	55	120	230	17
AV21.03	Rombopack 9M	0,5	o	130	260	54	120	230	17
AV21.04	Rombopack 9M	0,67	o	179	260	53	170	230	20
AV21.05	Rombopack 9M	0,67	o	177	260	53	169	230	19
AV21.06	Rombopack 9M	0,67	o	179	260	54	170	230	19
AV21.07	Rombopack 9M	0,33	w	86	260	39	80	230	27
AV21.08	Rombopack 9M	0,33	w	84	260	40	78	230	27
AV21.09	Rombopack 9M	0,33	w	85	260	39	79	230	27
AV21.10	Rombopack 9M	0,83	o	216	260	49	214	230	23
AV21.11	Rombopack 9M	0,83	o	218	260	49	214	230	24
AV22.01	Rombopack 12M	0,67	o	170	250	59	170	230	19
AV22.02	Rombopack 12M	0,67	o	170	251	57	170	230	21
AV22.03	Rombopack 12M	0,67	o	173	250	58	170	229	18
AV22.04	Rombopack 12M	0,83	o	211	250	56	210	229	30
AV22.05	Rombopack 12M	0,83	o	211	251	54	213	230	27
AV22.06	Rombopack 12M	0,83	o	211	250	53	211	229	27
AV22.07	Rombopack 12M	0,33	w	84	250	40	74	229	29
AV22.08	Rombopack 12M	0,33	w	82	250	39	71	229	28
AV22.09	Rombopack 12M	0,33	w	84	250	40	70	229	28
AV22.10	Rombopack 12M	0,25	w	63	250	41	55	229	27
AV22.11	Rombopack 12M	0,25	w	63	250	40	53	229	27
AV22.12	Rombopack 12M	0,25	w	64	250	39	53	229	25
AV22.13	Rombopack 12M	0,5	o	130	260	56	118	230	16
AV22.14	Rombopack 12M	0,5	o	130	258	55	119	230	18
AV22.15	Rombopack 12M	0,5	o	129	259	56	119	230	18
AV22.01	Rombopack 12M	0,67	o	170	250	59	170	230	19

AV22.02	Rombopack 12M	0,67	o	170	251	57	170	230	21
AV22.03	Rombopack 12M	0,67	o	173	250	58	170	229	18
AV22.04	Rombopack 12M	0,83	o	211	250	56	210	229	30
AV22.05	Rombopack 12M	0,83	o	211	251	54	213	230	27
AV22.06	Rombopack 12M	0,83	o	211	250	53	211	229	27
AV22.07	Rombopack 12M	0,33	w	84	250	40	74	229	29
AV22.08	Rombopack 12M	0,33	w	82	250	39	71	229	28
AV22.09	Rombopack 12M	0,33	w	84	250	40	70	229	28

7.8.2.2 System n-Butanol + Wasser



Versuchs-Nr.	Einbau	α	Dispersions- richtung	Absetzversuch Mixer			Absetzversuch Settler		
				h_W	h_{ges}	t_E	h_W	h_{ges}	t_E
				mm	mm	s	mm	mm	s
AV13.01	Platten ES 10 mm	0,5	o	115	230	55	120	230	27
AV13.02	Platten ES 10 mm	0,5	o	115	230	54	120	230	27
AV13.03	Platten ES 10 mm	0,5	o	116	230	57	120	230	25
AV13.04	Platten ES 10 mm	0,67	o	158	230	53	163	230	19
AV13.05	Platten ES 10 mm	0,67	o	159	230	53	164	230	19
AV13.06	Platten ES 10 mm	0,67	o	159	230	53	163	230	18
AV13.07	Platten ES 10 mm	0,33	w	80	230	47	75	230	22
AV13.08	Platten ES 10 mm	0,33	w	80	229	48	75	230	23
AV13.09	Platten ES 10 mm	0,33	w	80	230	45	75	230	18
AV13.10	Platten ES 10 mm	0,83	o	192	230	42	200	230	18
AV13.11	Platten ES 10 mm	0,83	o	193	230	41	199	230	18
AV13.12	Platten ES 10 mm	0,83	o	192	230	43	198	230	17
AV13.13	Platten ES 10 mm	0,25	w	62	230	29	58	230	17
AV13.14	Platten ES 10 mm	0,25	w	62	229	28	59	230	17
AV13.15	Platten ES 10 mm	0,25	w	60	230	28	57	230	16
AV14.01	Platten ES 22 mm	0,5	o	122	241	64	116	229	25
AV14.02	Platten ES 22 mm	0,5	o	122	242	63	115	230	29
AV14.03	Platten ES 22 mm	0,5	o	121	240	62	115	229	28
AV14.04	Platten ES 22 mm	0,33	w	80	240	43	75	229	24
AV14.05	Platten ES 22 mm	0,33	w	80	240	44	75	228	23
AV14.06	Platten ES 22 mm	0,33	w	80	240	44	75	229	23
AV14.07	Platten ES 22 mm	0,67	o	160	240	54	155	229	22
AV14.08	Platten ES 22 mm	0,67	o	160	240	55	153	230	23
AV14.09	Platten ES 22 mm	0,67	o	160	240	55	153	230	25
AV14.10	Platten ES 22 mm	0,17	w	41	240	32	35	230	21
AV14.11	Platten ES 22 mm	0,17	w	41	240	32	32	230	22
AV14.12	Platten ES 22 mm	0,17	w	40	240	33	32	230	20
AV14.13	Platten ES 22 mm	0,83	o	203	240	49	191	230	20

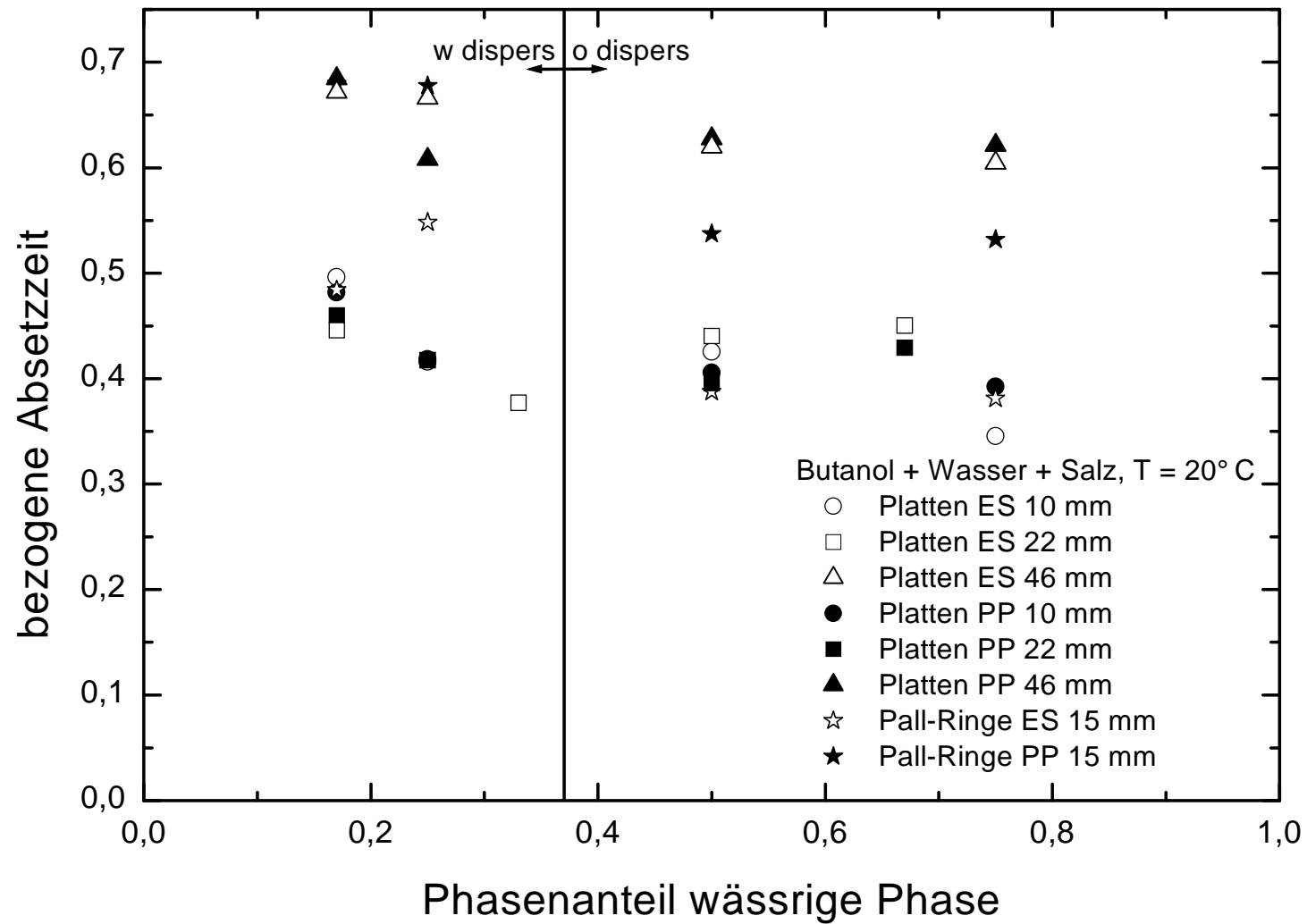
AV14.14	Platten ES 22 mm	0,83	o	203	240	49	192	230	23
AV14.15	Platten ES 22 mm	0,83	o	200	240	50	193	230	21
AV15.01	Platten ES 46 mm	0,5	o	108	240	67	101	225	34
AV15.02	Platten ES 46 mm	0,5	o	125	245	71	114	228	37
AV15.03	Platten ES 46 mm	0,5	o	125	250	69	114	230	39
AV15.04	Platten ES 46 mm	0,5	o	125	246	67	114	230	37
AV15.05	Platten ES 46 mm	0,5	o	125	244	64	114	229	37
AV15.06	Platten ES 46 mm	0,67	o	170	230	55	155	225	32
AV15.07	Platten ES 46 mm	0,67	o	170	230	61	156	230	35
AV15.08	Platten ES 46 mm	0,67	o	170	230	60	155	230	33
AV15.09	Platten ES 46 mm	0,33	w	84	240	51	73	230	26
AV15.10	Platten ES 46 mm	0,33	w	84	240	51	73	229	27
AV15.11	Platten ES 46 mm	0,33	w	84	240	50	72	229	26
AV15.12	Platten ES 46 mm	0,17	w	43	245	34	32	229	22
AV15.13	Platten ES 46 mm	0,17	w	43	245	35	30	229	22
AV15.14	Platten ES 46 mm	0,17	w	41	245	34	30	229	22
AV15.15	Platten ES 46 mm	0,83	o	208	246	57	191	229	32
AV15.16	Platten ES 46 mm	0,83	o	210	249	56	193	230	37
AV15.17	Platten ES 46 mm	0,83	o	216	247	57	192	229	37
AV16.01	Platten PP 10 mm	0,5	o	115	230	54	120	240	23
AV16.02	Platten PP 10 mm	0,5	o	115	230	56	120	235	23
AV16.03	Platten PP 10 mm	0,5	o	115	230	55	122	240	23
AV16.04	Platten PP 10 mm	0,67	o	154	230	51	159	240	19
AV16.05	Platten PP 10 mm	0,67	o	153	229	50	159	240	19
AV16.06	Platten PP 10 mm	0,67	o	151	230	51	156	237	18
AV16.07	Platten PP 10 mm	0,33	w	79	230	39	78	237	20
AV16.08	Platten PP 10 mm	0,33	w	78	229	39	78	238	21
AV16.09	Platten PP 10 mm	0,33	w	78	229	38	78	238	19
AV16.10	Platten PP 10 mm	0,83	o	190	229	44	198	230	20
AV16.11	Platten PP 10 mm	0,83	o	191	230	43	198	230	28
AV16.12	Platten PP 10 mm	0,83	o	192	230	43	198	235	20

AV16.13	Platten PP 10 mm	0,25	w	61	230	29	60	235	16
AV16.14	Platten PP 10 mm	0,25	w	61	230	28	60	235	18
AV16.15	Platten PP 10 mm	0,25	w	60	230	29	58	235	16
AV17.01	Platten PP 22 mm	0,5	o	124	240	58	115	230	24
AV17.02	Platten PP 22 mm	0,5	o	123	240	57	115	230	24
AV17.03	Platten PP 22 mm	0,5	o	123	240	58	115	229	23
AV17.04	Platten PP 22 mm	0,67	o	165	240	54	151	229	23
AV17.05	Platten PP 22 mm	0,67	o	164	239	54	150	230	24
AV17.06	Platten PP 22 mm	0,67	o	163	240	54	153	230	23
AV17.07	Platten PP 22 mm	0,33	w	85	240	55	76	230	24
AV17.08	Platten PP 22 mm	0,33	w	85	240	54	76	230	25
AV17.09	Platten PP 22 mm	0,33	w	85	240	53	76	230	23
AV17.10	Platten PP 22 mm	0,83	o	203	240	46	195	230	20
AV17.11	Platten PP 22 mm	0,83	o	204	239	46	195	230	21
AV17.12	Platten PP 22 mm	0,83	o	203	240	46	196	230	21
AV17.13	Platten PP 22 mm	0,17	w	44	239	31	36	228	18
AV17.14	Platten PP 22 mm	0,17	w	44	240	30	35	230	18
AV17.15	Platten PP 22 mm	0,17	w	45	240	30	36	230	18
AV18.01	Platten PP 46 mm	0,5	o	125	247	65	115	229	39
AV18.02	Platten PP 46 mm	0,5	o	126	248	64	115	230	37
AV18.03	Platten PP 46 mm	0,5	o	125	247	65	115	229	40
AV18.04	Platten PP 46 mm	0,67	o	168	247	60	156	229	38
AV18.05	Platten PP 46 mm	0,67	o	169	247	61	156	230	37
AV18.06	Platten PP 46 mm	0,67	o	168	247	60	156	229	38
AV18.07	Platten PP 46 mm	0,83	o	207	248	53	190	229	36
AV18.08	Platten PP 46 mm	0,75	o	190	249	57	175	230	34
AV18.09	Platten PP 46 mm	0,75	o	188	248	55	174	229	35
AV18.10	Platten PP 46 mm	0,75	o	189	247	56	174	229	34
AV18.11	Platten PP 46 mm	0,33	w	83	246	52	75	229	31
AV18.12	Platten PP 46 mm	0,33	w	83	248	53	74	229	31
AV18.13	Platten PP 46 mm	0,33	w	83	248	51	74	230	35

AV18.14	Platten PP 46 mm	0,17	w	43	247	46	35	229	27
AV18.15	Platten PP 46 mm	0,17	w	44	247	47	35	229	29
AV18.16	Platten PP 46 mm	0,17	w	43	247	48	34	229	29
AV19.01	Pall-Ringe ES 15 mm	0,5	o	115	250	57	110	230	20
AV19.02	Pall-Ringe ES 15 mm	0,5	o	115	250	56	110	230	19
AV19.03	Pall-Ringe ES 15 mm	0,5	o	115	250	56	110	230	18
AV19.04	Pall-Ringe ES 15 mm	0,67	o	167	250	55	156	230	24
AV19.05	Pall-Ringe ES 15 mm	0,67	o	167	250	56	157	230	23
AV19.06	Pall-Ringe ES 15 mm	0,67	o	168	250	55	158	230	23
AV19.07	Pall-Ringe ES 15 mm	0,33	w	81	250	44	78	230	17
AV19.08	Pall-Ringe ES 15 mm	0,33	w	83	250	51	78	230	18
AV19.09	Pall-Ringe ES 15 mm	0,33	w	83	250	51	78	230	17
AV19.10	Pall-Ringe ES 15 mm	0,33	w	84	250	54	78	230	19
AV19.11	Pall-Ringe ES 15 mm	0,33	w	84	245	54	76	235	18
AV19.12	Pall-Ringe ES 15 mm	0,33	w	84	245	54	77	235	19
AV19.13	Pall-Ringe ES 15 mm	0,83	o	207	250	50	195	230	18
AV19.14	Pall-Ringe ES 15 mm	0,83	o	207	250	50	197	230	18
AV19.15	Pall-Ringe ES 15 mm	0,83	o	208	250	49	195	230	17
AV19.16	Pall-Ringe ES 15 mm	0,83	o	208	245	49	200	235	18
AV19.17	Pall-Ringe ES 15 mm	0,83	o	209	245	48	200	235	19
AV19.18	Pall-Ringe ES 15 mm	0,25	w	62	250	32	55	230	17
AV19.19	Pall-Ringe ES 15 mm	0,25	w	63	250	32	55	230	17
AV19.20	Pall-Ringe ES 15 mm	0,25	w	62	250	31	55	230	18
AV20.01	Pall-Ringe PP 15 mm	0,5	o	125	250	58	116	230	26
AV20.02	Pall-Ringe PP 15 mm	0,5	o	125	250	59	116	230	29
AV20.03	Pall-Ringe PP 15 mm	0,5	o	125	250	59	117	232	27
AV20.04	Pall-Ringe PP 15 mm	0,67	o	169	250	55	164	232	27
AV20.05	Pall-Ringe PP 15 mm	0,67	o	169	250	55	163	232	27
AV20.06	Pall-Ringe PP 15 mm	0,67	o	170	250	53	165	232	26
AV20.07	Pall-Ringe PP 15 mm	0,33	w	84	250	46	79	235	22
AV20.08	Pall-Ringe PP 15 mm	0,33	w	85	250	45	79	235	23

AV20.09	Pall-Ringe PP 15 mm	0,33	w	84	250	43	79	235	21
AV20.10	Pall-Ringe PP 15 mm	0,33	w	84	245	53	79	235	23
AV20.11	Pall-Ringe PP 15 mm	0,33	w	84	245	54	79	235	24
AV20.12	Pall-Ringe PP 15 mm	0,83	o	207	250	50	200	235	26
AV20.13	Pall-Ringe PP 15 mm	0,83	o	209	250	49	201	235	25
AV20.14	Pall-Ringe PP 15 mm	0,83	o	207	250	51	201	235	26
AV20.15	Pall-Ringe PP 15 mm	0,25	w	64	250	32	59	235	23
AV20.16	Pall-Ringe PP 15 mm	0,25	w	64	250	31	59	235	24
AV20.17	Pall-Ringe PP 15 mm	0,25	w	64	250	31	59	235	23
AV23.01	Gestrickpackung Rhodius	0,5	o	124	249	59	117	233	25
AV23.02	Gestrickpackung Rhodius	0,5	o	122	248	62	115	232	27
AV23.03	Gestrickpackung Rhodius	0,5	o	122	242	61	113	228	29
AV23.04	Gestrickpackung Rhodius	0,5	o	123	243	64	117	229	28
AV23.05	Gestrickpackung Rhodius	0,67	o	164	244	61	157	229	29
AV23.06	Gestrickpackung Rhodius	0,67	o	164	244	61	157	229	28
AV23.07	Gestrickpackung Rhodius	0,33	w	84	244	37	77	228	25
AV23.08	Gestrickpackung Rhodius	0,33	w	84	244	36	76	227	25
AV23.09	Gestrickpackung Rhodius	0,25	w	56	242	37	47	226	24
AV23.10	Gestrickpackung Rhodius	0,25	w	56	243	36	48	228	25

7.8.2.3 System n-Butanol + Wasser + NaCl



Versuchs-Nr.	Einbau	α	Dispersions- richtung	Absetzversuch Mixer			Absetzversuch Settler		
				h_W	h_{ges}	t_E	h_W	h_{ges}	t_E
				mm	mm	s	mm	mm	s
AV24.01	Platten ES 10 mm	0,17	w	38	230	86	27	233	42
AV24.02	Platten ES 10 mm	0,17	w	38	229	85	26	232	45
AV24.03	Platten ES 10 mm	0,17	w	38	229	85	26	233	40
AV24.04	Platten ES 10 mm	0,25	w	57	230	108	41	232	49
AV24.05	Platten ES 10 mm	0,25	w	56	229	111	42	232	45
AV24.06	Platten ES 10 mm	0,25	w	59	230	126	50	231	49
AV24.07	Platten ES 10 mm	0,5	o	113	229	62	113	233	26
AV24.08	Platten ES 10 mm	0,5	o	114	229	62	113	232	26
AV24.09	Platten ES 10 mm	0,5	o	115	230	64	114	232	28
AV24.10	Platten ES 10 mm	0,75	o	173	230	55	176	233	19
AV24.11	Platten ES 10 mm	0,75	o	171	229	55	176	232	19
AV24.12	Platten ES 10 mm	0,75	o	172	230	55	176	232	19
AV25.01	Platten ES 22 mm	0,5	o	122	243	64	112	231	29
AV25.02	Platten ES 22 mm	0,5	o	121	243	64	112	231	28
AV25.03	Platten ES 22 mm	0,5	o	120	242	65	112	231	28
AV25.04	Platten ES 22 mm	0,67	o	164	244	59	154	231	28
AV25.05	Platten ES 22 mm	0,67	o	164	244	60	155	232	27
AV25.06	Platten ES 22 mm	0,67	o	164	244	61	155	233	26
AV25.07	Platten ES 22 mm	0,33	w	80	243	189	73	232	75
AV25.08	Platten ES 22 mm	0,33	w	80	244	180	75	233	68
AV25.09	Platten ES 22 mm	0,33	w	80	244	163	73	231	60
AV25.10	Platten ES 22 mm	0,33	w	79	243	164	70	233	60
AV25.11	Platten ES 22 mm	0,17	w	39	242	98	30	231	43
AV25.12	Platten ES 22 mm	0,17	w	40	244	99	30	233	45
AV25.13	Platten ES 22 mm	0,17	w	39	243	99	30	231	44
AV26.01	Platten ES 46 mm	0,5	o	125	245	69	111	225	41
AV26.02	Platten ES 46 mm	0,5	o	125	245	68	111	227	43
AV26.03	Platten ES 46 mm	0,5	o	124	245	68	112	226	43

AV26.04	Platten ES 46 mm	0,75	o	187	249	59	170	230	36
AV26.05	Platten ES 46 mm	0,75	o	187	248	60	172	230	36
AV26.06	Platten ES 46 mm	0,75	o	187	240	58	173	230	35
AV26.07	Platten ES 46 mm	0,25	w	62	247	136	50	230	89
AV26.08	Platten ES 46 mm	0,25	w	62	247	137	50	230	89
AV26.09	Platten ES 46 mm	0,25	w	62	247	137	50	230	95
AV26.10	Platten ES 46 mm	0,17	w	43	250	103	32	230	72
AV26.11	Platten ES 46 mm	0,17	w	44	250	101	34	234	68
AV26.12	Platten ES 46 mm	0,17	w	44	250	102	32	230	66
AV26.13	Platten ES 46 mm	0,17	w	43	250	102	31	230	68
AV27.01	Platten PP 10 mm	0,17	w	38	230	103	29	233	31
AV27.02	Platten PP 10 mm	0,17	w	38	229	88	28	234	42
AV27.03	Platten PP 10 mm	0,17	w	38	230	93	28	236	51
AV27.04	Platten PP 10 mm	0,17	w	38	230	95	28	236	60
AV27.05	Platten PP 10 mm	0,17	w	38	229	98	30	233	44
AV27.06	Platten PP 10 mm	0,25	w	56	229	119	43	235	50
AV27.07	Platten PP 10 mm	0,25	w	56	229	117	42	235	47
AV27.08	Platten PP 10 mm	0,25	w	57	229	120	43	235	52
AV27.09	Platten PP 10 mm	0,5	o	114	229	60	116	235	26
AV27.10	Platten PP 10 mm	0,5	o	114	229	60	115	235	24
AV27.11	Platten PP 10 mm	0,5	o	114	229	60	115	235	23
AV27.12	Platten PP 10 mm	0,75	o	171	229	52	178	235	19
AV27.13	Platten PP 10 mm	0,75	o	172	229	53	178	235	23
AV27.14	Platten PP 10 mm	0,75	o	172	229	53	178	234	20
AV28.01	Platten PP 22 mm	0,5	o	121	240	62	112	230	25
AV28.02	Platten PP 22 mm	0,5	o	121	240	63	115	232	25
AV28.03	Platten PP 22 mm	0,5	o	122	240	62	113	231	24
AV28.04	Platten PP 22 mm	0,67	o	163	243	59	155	235	25
AV28.05	Platten PP 22 mm	0,67	o	163	242	59	155	235	25
AV28.06	Platten PP 22 mm	0,67	o	164	245	59	155	233	26
AV28.07	Platten PP 22 mm	0,25	w	60	245	134	50	230	56

AV28.08	Platten PP 22 mm	0,25	w	60	243	133	50	233	55
AV28.09	Platten PP 22 mm	0,25	w	60	242	133	50	235	56
AV28.10	Platten PP 22 mm	0,17	w	41	242	94	30	233	44
AV28.11	Platten PP 22 mm	0,17	w	42	242	98	30	232	45
AV28.12	Platten PP 22 mm	0,17	w	42	243	95	30	233	43
AV29.01	Platten PP 46 mm	0,5	o	127	248	71	116	231	44
AV29.02	Platten PP 46 mm	0,5	o	124	248	71	114	230	44
AV29.03	Platten PP 46 mm	0,5	o	125	249	70	114	230	45
AV29.04	Platten PP 46 mm	0,75	o	187	249	64	172	231	39
AV29.05	Platten PP 46 mm	0,75	o	187	249	63	173	231	39
AV29.06	Platten PP 46 mm	0,75	o	187	249	63	173	232	40
AV29.07	Platten PP 46 mm	0,25	w	62	249	139	55	231	87
AV29.08	Platten PP 46 mm	0,25	w	62	249	138	53	231	84
AV29.09	Platten PP 46 mm	0,25	w	63	248	139	54	230	82
AV29.10	Platten PP 46 mm	0,17	w	40	248	104	31	231	70
AV29.11	Platten PP 46 mm	0,17	w	40	249	103	31	230	71
AV29.12	Platten PP 46 mm	0,17	w	40	249	97	30	230	67
AV30.01	Pall-Ringe ES 15 mm	0,17	w	44	250	110	34	233	43
AV30.02	Pall-Ringe ES 15 mm	0,17	w	41	249	97	28	230	51
AV30.03	Pall-Ringe ES 15 mm	0,17	w	41	249	99	28	232	53
AV30.04	Pall-Ringe ES 15 mm	0,25	w	62	250	127	48	234	69
AV30.05	Pall-Ringe ES 15 mm	0,25	w	62	250	127	49	233	70
AV30.06	Pall-Ringe ES 15 mm	0,25	w	62	250	129	49	232	71
AV30.07	Pall-Ringe ES 15 mm	0,5	o	114	249	69	113	232	27
AV30.08	Pall-Ringe ES 15 mm	0,5	o	125	250	70	115	232	26
AV30.09	Pall-Ringe ES 15 mm	0,5	o	124	249	70	113	231	28
AV30.10	Pall-Ringe ES 15 mm	0,75	o	187	249	61	175	233	23
AV30.11	Pall-Ringe ES 15 mm	0,75	o	187	250	60	175	233	24
AV30.12	Pall-Ringe ES 15 mm	0,75	o	188	249	60	174	232	22
AV31.01	Pall-Ringe PP 15 mm	0,17	w	41	240	113	32	228	70
AV31.02	Pall-Ringe PP 15 mm	0,17	w	40	239	103	30	230	72

AV31.03	Pall-Ringe PP 15 mm	0,17	w	40	239	100	30	230	72
AV31.04	Pall-Ringe PP 15 mm	0,25	w	59	240	131	50	232	89
AV31.05	Pall-Ringe PP 15 mm	0,25	w	60	240	132	49	230	89
AV31.06	Pall-Ringe PP 15 mm	0,25	w	59	240	134	50	230	91
AV31.07	Pall-Ringe PP 15 mm	0,5	o	119	239	67	113	230	36
AV31.08	Pall-Ringe PP 15 mm	0,5	o	120	240	67	113	230	37
AV31.09	Pall-Ringe PP 15 mm	0,5	o	120	240	67	114	231	35
AV31.10	Pall-Ringe PP 15 mm	0,75	o	180	240	59	171	231	31
AV31.11	Pall-Ringe PP 15 mm	0,75	o	180	240	57	172	231	31
AV31.12	Pall-Ringe PP 15 mm	0,75	o	180	240	57	172	230	30

7.8.2.4 System Toluol + Wasser

Versuchs-Nr.	Einbau	α	Dispersions- richtung	Absetzversuch Mixer			Absetzversuch Settler		
				h_w	h_{ges}	t_E	h_w	h_{ges}	t_E
				mm	mm	s	mm	mm	s
AV32.01	Pall-Ringe ES 15 mm	0,5	o	120	240	24,66			3,09
AV32.02	Pall-Ringe ES 15 mm	0,5	o	120	240	25,47			3,16
AV33.03	Pall-Ringe ES 15 mm	0,5	o	120	240	26,72			2,65

8 Literaturverzeichnis

- Amasheh, H., 1989: *Untersuchungen zum Abscheideverhalten von Flüssig-Flüssig-Systemen im Rührkessel*. Dissertation, RWTH Aachen.
- Berger, R., 1986: *Koaleszenzprobleme in chemischen Prozessen*. Chem.-Ing.-Tech. **58**(6), 449-456.
- Blaß, E., Rommel, W., 1993: *Tropfenabscheidung in Flüssig-flüssig-Systemen*. Jahrbuch Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, VDI Verlag, Düsseldorf, 259-282.
- Bohnet, M., 1976: *Trennen nicht mischbarer Flüssigkeiten*. Chem.-Ing.-Tech. **48**(3), 177-189.
- Borgmann, S., 1995: *Konstruktion und Inbetriebnahme einer Rührzelle zur Durchführung von Absetzversuchen*. Studienarbeit, Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik, RWTH Aachen.
- Chatterjee, M. R., 1998: *Dimensionierung liegender Flüssig-Flüssig-Abscheider mit Platteneinbauten*. VDI Fortschr.-Ber., Reihe 3, Nr. 558, VDI Verlag, Düsseldorf,.
- Chatterjee, M., Franken, H., Hülswitt, N., Speth, H., Pfennig, A.: *High-efficiency liquid-liquid phase separation with internals*. ACHEMA 2003, 19.-23.05.2003, Frankfurt.
- Connemann, M., Gaube, J., Leffrang, U., Müller, S., Pfennig, A., 1991: *Phase Equilibria in the System Poly(ethylene glycol) + Dextran + Water*. J. Chem. Eng. Data **36**, 446-448.
- Freitag, C., 2003: *Aufbau und Inbetriebnahme eines Absetzversuches mit Einbauten*. Studienarbeit, Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik, RWTH Aachen.
- Gerth, K., 2000: *Koaleszenzabscheider aus Borosilicatglas*. Filtrieren und Separieren **14**(2), 72-75.
- Hartland, S., Jeelani, S. A. K., 1988: *Predictions of Sedimentation and Coalescence Profiles in a decaying Batch Dispersion*. Chem. Eng. Sci. **43**(9), 2421-2429.
- Hartland, S., Jeelani, S. A. K., 1998: *Effect of dispersion properties on the separation of batch liquid-liquid dispersions*. Ind. Eng. Chem. Res. **37**, 547-554.
- Heikamp, W., 1995: *Neue Abscheidergeneration*. Verfahrenstechnik **29**(7-8), 57-59.
- Hennessey, P. M., Neuman, M., Kalis, B. A., Hellinx, G., 1995: *Use coalescing methods to solve emulsion problems*. Hydrocarbon Processing, November, 107-124.
- Henschke, M., 1995: *Dimensionierung liegender Flüssig-flüssig-Abscheider anhand diskontinuierlicher Absetzversuche*. VDI Fortschr.-Ber., Reihe 3, Nr. 379, VDI Verlag, Düsseldorf.
- Henschke, M., 2003: *Auslegung pulsierter Siebboden-Extraktionskolonnen*. Habilitationsschrift, RWTH Aachen.
- Hooper, W. B., Jacobs jr., L. J., 1979: *Decantation*. in Schweitzer, Ph. A.: *Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineers*. McGraw-Hill, New York.
- Hülswitt, N., Pfennig, A.: *Dimensionierung liegender Flüssig-Flüssig-Abscheider mit Einbauten auf der Basis von Laborversuchen*. Gemeinsame Sitzung der Fachausschüsse (GVC / DECHEMA) "Das Neue geschieht an den Grenzflächen", 05.-07.03.2003, Würzburg.

- Mersmann, A., 1980: *Zum Flutpunkt in Flüssig/Flüssig-Gegenstromkolonnen*. Chem.-Ing.-Tech. **52**(12), 933-942.
- Misek, T., Berger, R., Schröter, J., 1985: *Standard Test Systems for Liquid Extraction*. The Institution of Chemical Engineers, Rugby Warwickshire, England.
- Morrison, J., 1970: *Tilted-plate separators for refine*. The Oil and Gas Journal, December, 86-88.
- Müller, E., 1972: *Flüssig-Flüssig-Extraktion*. in Ullmann's Encyklopädie der technischen Chemie, Band 2, 546-574, Verlag Chemie GmbH, Weinheim.
- Mumford, C. J., Thomas, R. J., 1972: *Using coalescer aids to improve the design of liquid/liquid settlers*. Process Engineering, December, 54-58.
- Pfennig, A., 2004: *Thermodynamik der Gemische*. Springer Verlag, Berlin.
- Rommel, W., 1990: *Tropfenabscheidung in Schwerkraftapparaten mit Platteneinbauten*. Dissertation, TU München.
- Schlieper, L., 2001: *Trennung von Flüssig-Flüssig-Dispersionen in liegenden Abscheidern mit Platteneinbauten*. VDI Fortschr.-Ber., Reihe 3, Nr. 700, VDI Verlag, Düsseldorf.
- Selker, A.H., Sleicher, C.A.Jr., 1965: *Factors Affecting which Phase will Disperse when Immiscible Liquids are Stirred Together*. Can. J. Chem. Eng. **43**, 298-301.
- Speth, H., 2003: *Ein neues Modell zur Auslegung von Faserbett-Koaleszenzabscheidern*. Dissertation, RWTH Aachen.
- Wagner, I., 1999: *Einfluss der Viskosität auf den Stoffübergang in der Flüssig-Flüssig-Extraktion*. Dissertation, TU München.