

Fluidodynamik eines Flüssigkeitsfilms an einem vertikalen Draht

Jochen Grünig*, Matthias Kraume und Alexey Shilkin

Einem vertikalen Draht wird kontinuierlich Flüssigkeit zugeführt, welche als Film herabläuft. Ein Gasstrom wird im Gegenstrom geführt, welcher die Strömung der Flüssigkeit beeinflusst. In der vorliegenden Untersuchung werden die lokale Filmdicke sowie die Belastungsgrenzen experimentell bestimmt. Als Stoffsysteme werden Luft/Wasser und Luft/Ethanol eingesetzt. In beiden Fällen bildet sich eine Strömungsstruktur aus, bei der ein dünner Basisfilm von einzelnen „Flüssigkeitsperlen“ überlaufen wird. Im Stoffsystem Luft/Wasser bildet sich dabei ein dünnerer Basisfilm aus und die Perlen weisen eine größere Dicke auf. Mit zunehmender Gasbelastung bilden sich größere Perlen und ein dünnerer Basisfilm, wodurch der Transport der Flüssigkeit hauptsächlich durch die Perlen erfolgt. Es lassen sich sehr hohe Gasbelastungen erzielen, der maximale F-Faktor am Flutpunkt für das Stoffsystem Luft/Wasser beträgt $8,1 \text{ Pa}^{1/2}$.

1 Einleitung

In vielen technischen Apparaten werden Flüssigkeitsfilme für den Wärme- oder Stoffaustausch in Gas/Flüssigkeits-Systemen eingesetzt. Dabei werden die beiden kontinuierlichen Phasen in Kontakt gebracht, wobei die Flüssigphase eine feste Oberfläche als Film benetzt. Typische Anwendungen sind Fallfilmverdampfer und Packungskolonnen, in denen die Flüssigkeit durch den Einfluss der Schwerkraft an der Oberfläche von Einbauten nach unten rieselt, während das Gas i. A. im Gegenstrom geführt wird.

Bei der Auslegung von Packungskolonnen spielen die Fluidodynamik und der Stofftransport eine zentrale Rolle. Die Ziele für eine Optimierung sind neben hohen Gas- und Flüssigkeitsdurchsätzen ein geringer höhenbezogener Druckverlust, eine hohe Stoffaustauschfläche sowie eine gleichmäßige Flüssigkeitsverteilung über den Querschnitt der Kolonne. Konventionelle Einbauten, wie z.B. regellose Füllkörperschüttungen oder geordnete Packungen, zeigen hohe spezifische Stoffaustauschflächen bei moderatem höhenbezogenen Druckverlust. Ihre Bauweise bedingt Belastungsgrenzen für den Gas- und Flüssigkeitsdurchsatz, bei denen es zum Mitreißen von Flüssigkeit und als Folge zum Fluten der Kolonne kommt. Nachteilig ist, dass die Flüssigkeit aufgrund der Fehlverteilung nach gewissen Höhenabschnitten durch spezielle Einbauten gegebenenfalls neu verteilt werden muss.

In der vorliegenden Untersuchung wird die Frage erörtert, ob eine Packung, die im Wesentlichen aus vertikal angeordneten Drähten besteht, Vorteile gegenüber konventionellen Packungen besitzt. Es wird angenommen, dass das Problem der Fehlverteilung der Flüssigkeit nicht auftritt, weil die auf die einzelnen Drähte verteilte Flüssigkeit am jeweiligen Draht verbleibt. Erwartet wird außerdem, dass der auf die Höhe der Packung bezogene Druckverlust wesentlich geringer ausfällt, weil die vertikal angeordneten Drähte im Gasstrom einen geringeren Strömungswiderstand aufweisen. Erste Untersuchungen von [1] an einer solchen Packungskonfiguration bestätigen diese Vermutungen. Als weiterer Vorteil

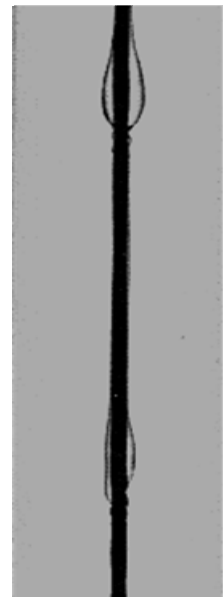


Abb. 1: Struktur der Filmströmung am Draht,
 $d_D = 1 \text{ mm}$,
Wasser/Luft

wird eine Verschiebung der Belastungsgrenzen zu höheren Gasgeschwindigkeiten bei gleicher Flüssigkeitsbelastung erwartet, was für die Abmessungen der Kolonne von wesentlicher Bedeutung ist.

Um die Fluidodynamik des Flüssigkeitsfilms im Detail analysieren zu können, wurden erste Untersuchungen an einem einzelnen Draht vorgenommen. Es wurden dabei der zeitliche Verlauf der lokalen Filmdicke sowie die Belastungsgrenzen gemessen. Die Notwendigkeit der Betrachtung des zeitlichen Verlaufs entsteht dadurch, dass sich auf dem Film bereits nach kurzen Lauflängen tropfenähnliche Strukturen (im Folgenden als „Perlen“ bezeichnet) ausbilden, die sich bei geringer Viskosität der Flüssigkeit mit hoher Geschwindigkeit abwärts bewegen (s. Abb. 1). Filmdicken von Rieselfilmen an ebenen Platten und an Rohren wurden bereits mit den unterschiedlichsten Methoden gemessen, einen Überblick über die Forschungsarbeiten zu welligen Rieselfilmen gibt z.B. [2]. Messungen an einzelnen Drähten wurden von [3, 4] durchgeführt. Dabei wurde unter anderem die Filmstruktur von Silikonölen und Wasser untersucht, ohne die Filmdicke und die Belastungsgrenzen detailliert zu betrachten.

2 Experimentelle Untersuchungen

Die Messungen der Filmdicke und der Belastungsgrenzen erfolgten mit den Stoffsystemen Luft/Wasser und Luft/Ethanol bei Raumtemperatur (20°C). Es wurden dabei voll entsalztes Wasser aus einer Umkehrosmoseanlage und Ethanol in Synthesequalität mit einer Konzentration von 96 Vol.-% verwendet. Die zugeführte Luft wurde mit einer dreistufigen Filtereinheit gereinigt, um Verschmutzungen der Anlage und der eingesetzten Stoffe zu vermeiden, und mit einem Druckminderer auf den Systemdruck entspannt. Dieser ergab sich aus dem atmosphärischen Druck zusätzlich der durch den Strömungswiderstand hervorgerufenen Druckdifferenz, welche in allen Versuchen < 3 mbar war. Die Stoffdaten der eingesetzten Stoffe sind in Tab. 1 aufgeführt.

Der schematische Versuchsaufbau ist in Abb. 2 skizziert. Die Versuche wurden in einem rechteckigen Glaskanal mit einer Innenquerschnittsfläche von 20 x 20 mm² und einer Länge von 1000 mm durchgeführt. Dieser ist an beiden Enden mit Anschlüssen für die Luftzufuhr und -abfuhr versehen. Mit einer Spannvorrichtung wird ein Draht zentrisch vertikal im Kanal gespannt. Der Draht besitzt eine Länge von ca. 1300 mm, einen

Tab. 1: Stoffdaten bei 20°C [5,6]

	ρ [kg/m ³]	η [mPa s]	σ [mN/m]
Wasser	998,2	1,0	72,74
Ethanol	810,0	1,2	23,03
Luft	1,2	18,7·10 ⁻³	-

Durchmesser von 1mm und besteht aus rostfreiem Stahl. Die Luft wird am unteren Ende des Glaskanals eingeleit, strömt nach oben, verlässt dort den Kanal und wird abgeführt. Der Luftvolumenstrom wird mittels Ventil und Rotameter eingestellt.

Die Flüssigkeit wird in einem geschlossenen Kreislauf geführt. Der Vorlagebehälter steht auf einer Waage, so dass die Veränderung der im Kreislauf zirkulierenden Flüssigkeitsmasse gemessen wird. Der Flüssigkeitsanteil, der vom Luftstrom mitgerissen und aus dem Glaskanal ausgetragen wird, führt letztendlich zu einer Verringerung der Masse der Flüssigkeit im Vorlagebehälter. Aus dem Vorlagebehälter wird die Flüssigkeit mit einer Zahnradpumpe kontinuierlich in ein oberes Ausgleichsgefäß gepumpt, welches die Druckschwankungen im Zulauf ausgleicht und zu diesem Zweck mit der Umgebung in Verbindung steht, so dass der ausfließende Volumenstrom nur durch die Füllhöhe bestimmt wird. Die Flüssigkeit fließt in einen Flüssigkeitsverteiler durch den der Draht zentrisch geführt wird, auf diese Weise wird der Flüssigkeitsfilm auf dem Draht erzeugt. Am

unteren Ende des Drahtes wird die Flüssigkeit mittels eines Trichters gesammelt und in den Vorlagebehälter zurückgeführt.

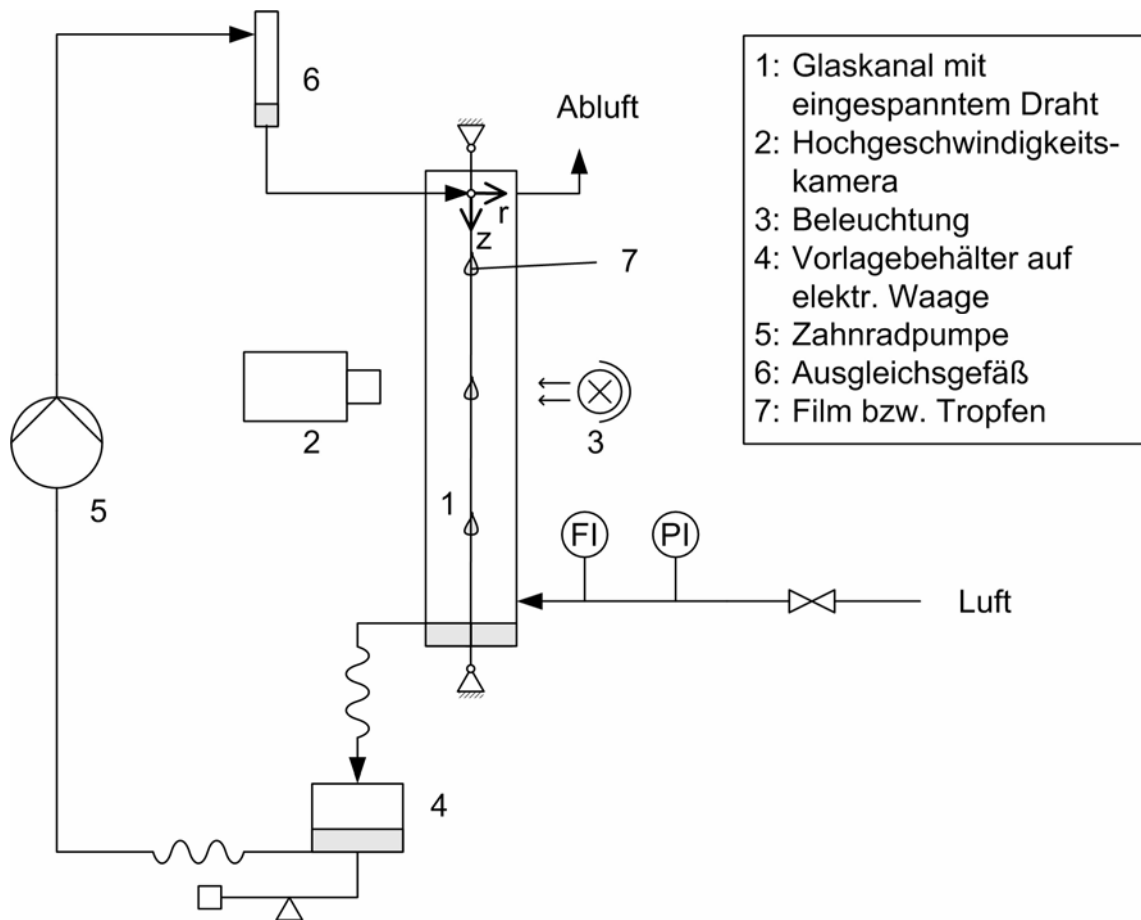


Abb. 2: Schematischer Aufbau der Versuchsanlage

Die Vorgänge im Glaskanal werden mit einer digitalen Hochgeschwindigkeitskamera (Fa. Photonfocus, MV-D752-160-CL-8, Auflösung: 752 x 582 Bildpunkte, maximale Bildrate bei Vollauflösung: 350 fps) erfasst. Als Beleuchtung dient ein LED-Leuchtelement (Fa. CCS, LND-300A-DF), welches gepulst und mit der Kamera synchronisiert wird. Sowohl Kamera als auch Beleuchtung lassen sich in vertikaler Richtung verschieben. Der Abstand der Kamera zum Glaskanal ist mit einem Positionierschlitten in r-Richtung einstellbar. Die Filmdickenmessungen erfolgen mit einem telezentrischen Objektiv (Sill GmbH, Correctal T/3.0), welches verzerrungsfreie, stark vergrößernde Aufnahmen ermöglicht. Die gewonnenen Bildsequenzen werden mit der Bildverarbeitungssoftware ImageProPlus® ausgewertet, so dass sich der zeitliche Verlauf der lokalen Filmdicke darstellen lässt.

In Abb. 3 ist eine fotografische Aufnahme des Flüssigkeitsfilms am Draht abgebildet. Zur Bestimmung der Filmdicke wurde dabei als Ausschnitt nur ein schmaler Streifen gewählt. Der Ausschnitt besitzt eine Größe von 752 x 20 Bildpunkten, wobei 1 Bildpunkt einer Länge von 10 μm in der Bildebene entspricht. Dies ermöglicht Aufnahmen mit einer Bildrate von 1000 Bildern pro Sekunde. Man erkennt den Draht in der Mitte des Bildes als dunkles Objekt, an das sich zu beiden Seiten der Flüssigkeitsfilm anschließt. Da die Flüssigkeit transparent ist, lässt sich die Filmdicke nur durch den Umstand ermitteln, dass der Rand des Films dunkler als die Umgebung erscheint. Man sieht weiterhin, dass der Film nicht notwendigerweise die gleiche Dicke über den Umfang aufweist. Die mittlere Filmdicke δ wurde daher aus dem arithmetischen Mittel des linken und

rechten Abschnitts in der Aufnahme gebildet. Als Maßstab diente der Durchmesser des Drahtes im unbenetzten Zustand.

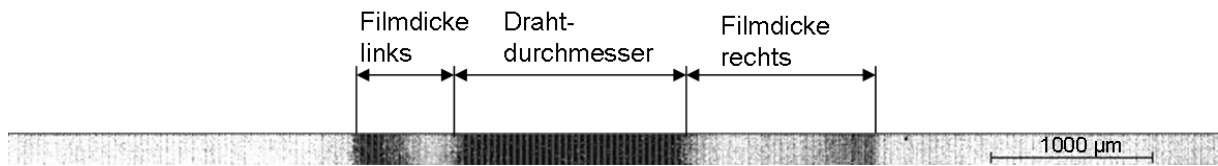


Abb. 3: Digitale fotografische Aufnahme des Films am Draht

Für die Bestimmung der Belastungsgrenzen wurde der Luftvolumenstrom bei konstanter Flüssigkeitsbelastung so weit erhöht, bis ein Mitreißen von Flüssigkeit (Entrainment) bzw. das Fluten der Anlage beobachtet werden konnte. Ursprünglich war geplant, den Punkt des einsetzenden Entrainments bei einem mitgerissenen Volumenstrom von 10 % des dem Draht zugeführten Flüssigkeitsvolumenstroms festzulegen. Es zeigte sich aber, dass diese Definition in der bestehenden Anlage keine zuverlässigen Werte lieferte. Einerseits besitzen die untersuchten Flüssigkeiten einen so hohen Dampfdruck bei Raumtemperatur, dass kontinuierlich Flüssigkeit in die Gasphase verdampft, was zu einem zusätzlichen unbestimmten Massenverlust führt. Andererseits zerfallen die Perlen am Draht ab einer bestimmten Gas- und Flüssigkeitsbelastung. Abb. 4 zeigt eine Bildsequenz dieses Vorgangs. Durch den Zerfall der Perlen bilden sich kleine Tochtertröpfchen, die vom Luftstrom mitgerissen oder an die Wand geschleudert werden und dort haften bleiben. Die Masse der an der Wand haftenden Flüssigkeit wird nicht in der Bilanzierung berücksichtigt und wirkt auf die Messung wie ein zusätzlicher Masseverlust.

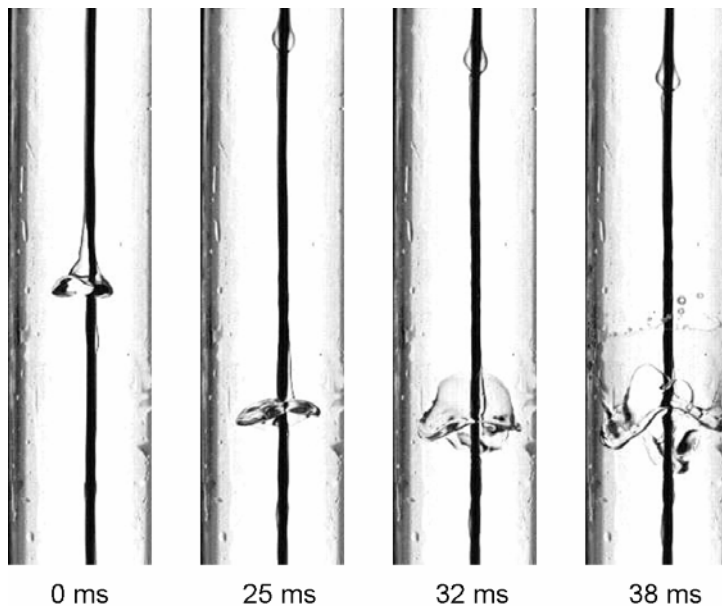


Abb. 4: Bildsequenz einer zerfallenden Perle; Stoffsystem Ethanol/Luft, Umfangsbelastung $B = 1,9 \text{ m}^3/(\text{m h})$, F-Faktor $F = 4,7 \text{ Pa}^{1/2}$, Bildrate 1000 fps

Als Grenze für beginnendes Entrainment wurde daher der Betriebszustand gewählt, bei dem ein regelmäßiger Zerfall der Perlen in der beschriebenen Weise zu beobachten war. Da es bei vertikalen Drähten anders als bei regellosen Füllkörpern keine Abtropfkanten gibt, war der Zerfall der Perlen die einzige beobachtete Ursache für freie mitgerissene Tropfen. Als Flutpunkt wurde der Zustand gewählt, bei dem die Flüssigkeit vom Draht durch den Gasstrom mitgerissen wird.

3 Ergebnisse

Für die Verallgemeinerung der Ergebnisse werden Kenngrößen verwendet, die die Belastung der Anlage durch die jeweiligen Phasen beschreiben. Die Umfangsbelastung

$$B = \dot{V}_f / U_D \quad (1)$$

bezieht den Flüssigkeitsvolumenstrom \dot{V}_f auf den Umfang des Drahts U_D . Der F-Faktor

$$F = v_g \sqrt{\rho_g} \quad (2)$$

stellt ein Maß für die Gasgeschwindigkeit im Glaskanal dar, wobei

$$v_g = \dot{V}_g / A_K \quad (3)$$

die Gasleerrohrgeschwindigkeit und ρ_g die Dichte des Gases bedeuten.

3.1 Filmdicke

Alle Messungen wurden bei einer Lauflänge von $z = 730$ mm durchgeführt. In Abb. 5 wird beispielhaft der gemessene zeitliche Verlauf der Filmdicke für das Stoffsystem Luft/Wasser gezeigt. Im zeitlichen Profil der lokalen Filmdicke δ zeigt sich folgende Struktur: An der Drahtoberfläche strömt ein Basisfilm, an dem in zeitlichen Abständen Filmspitzen auftreten, die der Perlendicke entsprechen. Die Dicke der Perlen kann sehr viel höhere Werte annehmen als die des Basisfilms. Für eine automatisierte Detektion der Perlen wurde daher ein Schwellwert von $500 \mu\text{m}$ eingeführt, bei dessen Überschreitung eine Perle erkannt wird. Dieser Wert wurde gewählt, weil sich bei der Auswertung von Messungen mit unterschiedlichen Parametern zeigte, dass die Dicke des Basisfilms diesen Wert zu keiner Zeit überschreitet. Auf diese Weise konnte automatisiert die Anzahl der Perlen pro Zeit und die mittlere Dicke der Perlen bestimmt werden. Die Dicke der Perlen wurde auf die gleiche Weise wie die Basisfilmdicke gemessen. Die mittlere Dicke des Basisfilms wurde bestimmt, indem ausschließlich Abschnitte des zeitlichen Profils der Filmdicke berücksichtigt wurden, in denen sich nur relativ kleine Änderungen der Filmdicke mit der Zeit ergaben. Das Zeitintervall für die Mittelung betrug beim System Luft/Wasser 1s und konnte für das System Luft/Ethanol durch Verbesserungen bei der Datenverarbeitung auf 10 s angehoben werden. Die Standardabweichung der Daten lag bei der Basisfilmdicke typischerweise zwischen 10 und 20 % des Mittelwerts, bei der Perlendicke bewegte sie sich in einem Bereich von 20 bis 40 %. Dies verdeutlicht die Unregelmäßigkeit der Filmstruktur.

Die Auswertungen der Filmdickenmessungen enthalten die Abbn. 6, 7 und 8. Es werden für die Frequenz und die Dicke der Perlen sowie für die Dicke des Basisfilms die zeitlichen Mittelwerte in Abhängigkeit von der Gasbelastung für konstante Flüssigkeitsbelastungen gezeigt. In Abb. 6 ist zu erkennen, dass die Frequenz bei niedriger Umfangsbelastung ($B = 0,2 \text{ m}^3/(\text{m h})$) für beide Stoffsysteme deutlich geringer ausfällt. Eine Erhöhung des F-Faktors bei niedriger Umfangsbelastung führt nach einem zeitweiligen Anstieg zu einer Verringerung der Frequenz. Die Ursache für den Abfall der Frequenz bei höheren Gasbelastungen ist in der Verzögerung der Perlen durch die Gasströmung zu finden. Die mittlere vertikale Geschwindigkeit der Perlen liegt zwischen 0,6 und 1,0 m/s.

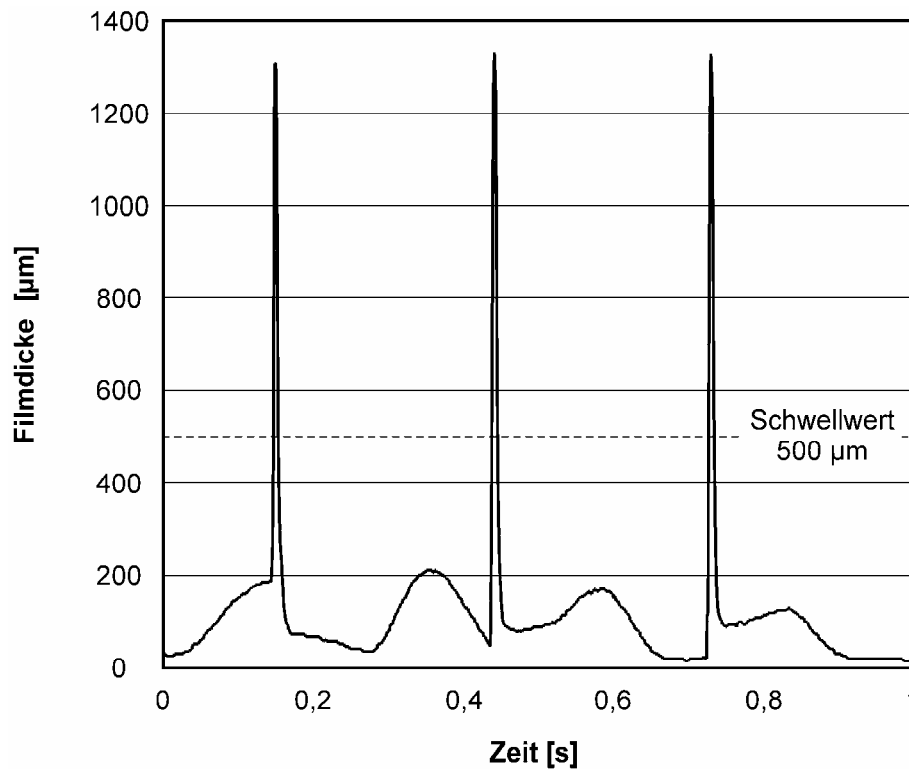


Abb. 5: Zeitlicher Verlauf der Filmdicke für eine Umfangsbelastung von $B = 0,2 \text{ m}^3/(\text{m h})$ und einer Gasbelastung von $F = 6,8 \text{ Pa}^{1/2}$ im Stoffsystem Wasser/Luft, Bildrate 1000 fps

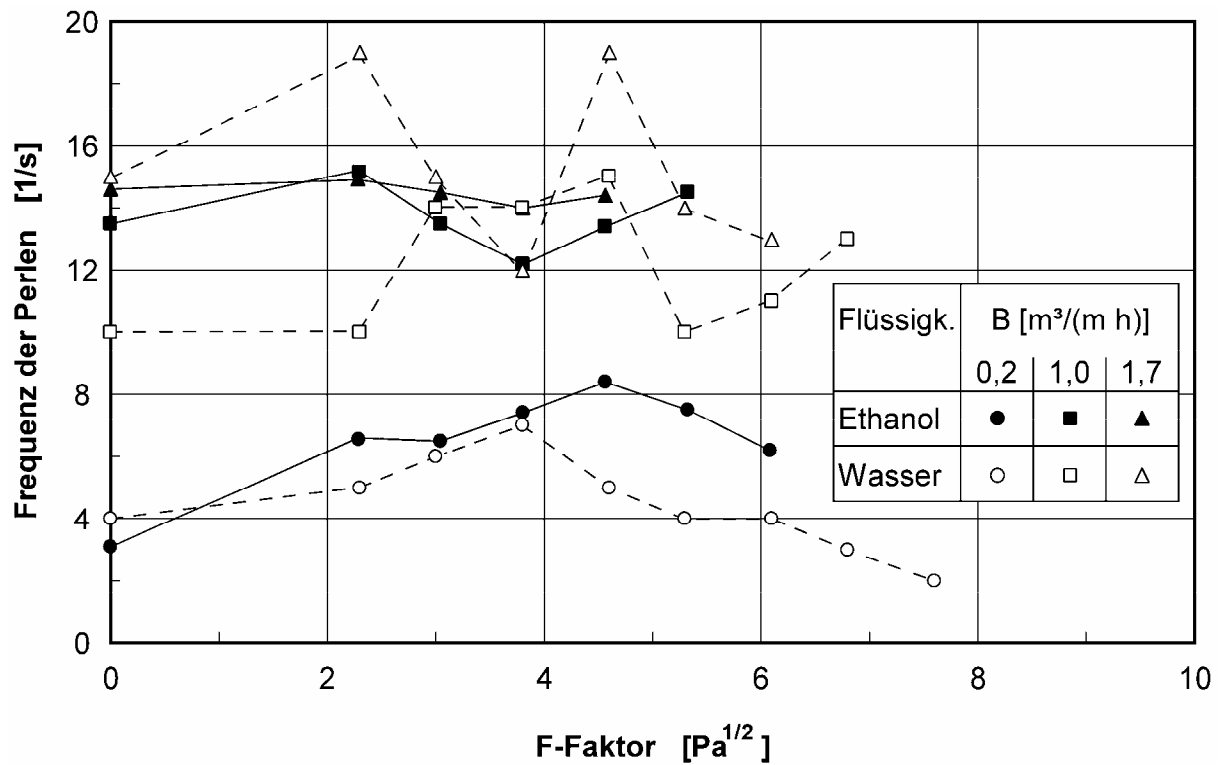


Abb. 6: Abhängigkeit der Frequenz der Perlen von der Gasbelastung bei verschiedenen Umfangsbelastungen B für die Stoffsysteme Wasser/Luft und Ethanol/Luft

Bei höheren Umfangsbelastungen tritt eine geringere Abhängigkeit der Frequenz von der Gasbelastung auf. Für das Stoffsystem Luft/Wasser ist die Streuung der Werte sehr groß, was darauf zurückzuführen ist, dass in diesem Fall nur eine Aufnahmedauer von 1 s realisiert wurde, was in Anbetracht der gemessenen Frequenzen sicherlich sehr kurz ist.

Abb. 7 zeigt die Dicke der Perlen in Abhängigkeit von den Betriebsparametern. Hier zeigt sich, dass die Perlen im Gegensatz zur Basisfilmdicke für das Stoffsystem Luft/Wasser größer sind. Die Perlenabmessung steigt erwartungsgemäß sowohl mit zunehmender Flüssigkeitsbelastung als auch mit steigender Gasbelastung deutlich, was einen höheren Flüssigkeitsinhalt (Holdup) ergibt. Ein ähnliches Verhalten tritt bei konventionellen Packungen auf.

Die Abhängigkeit der Dicke des Basisfilms von den Betriebsparametern ist in Abb. 8 dargestellt. Die Dicke liegt für das Stoffsystem Luft/Wasser bei unterschiedlichen Umfangsbelastungen deutlich unterhalb der von Luft/Ethanol. Dies ist teilweise auf die etwas höhere kinematische Viskosität von Ethanol zurückzuführen. Allerdings übersteigt der Unterschied der Basisfilmdicke bei weitem die Größenordnung, die sich aufgrund der Kenntnisse über ebene Flüssigkeitsfilme ergeben würde. Das unterschiedliche Verhalten der untersuchten Stoffsysteme lässt sich allein durch die stark voneinander abweichenden Oberflächenspannungen der Flüssigkeiten erklären, während die Viskositäten und Dichten der Flüssigkeiten ähnliche Werte aufweisen (s. Tab. 1). Der Einfluss der Oberflächenspannung auf die Fluidodynamik wird u. a. von [5] in einem Modell für dünne Drähte und Rohre beschrieben. Es wird gezeigt, dass eine zunehmende Oberflächenspannung bei ausreichend kleinem Durchmesser des Drahts eine Zunahme der Schwankungen der Filmdicke bewirkt. Wie zu erwarten, steigt bei beiden Stoffsystemen die Basisfilmdicke mit zunehmender Umfangsbelastung. Es lässt sich ein leichter Abfall der Basisfilmdicke mit steigender Gasbelastung erkennen.

Aus den Abbn. 6, 7 und 8 wird deutlich, dass die Messreihen für das Stoffsystem Luft/Wasser einen weiteren Bereich der Gasbelastung umfassen. Der Grund hierfür liegt in den höheren Belastungsgrenzen für dieses System, wie in Abschnitt 3.2 näher erläutert wird.

Wegen der Verzögerung des Flüssigkeitsfilms durch die Gasphase ergibt sich bei einem aufgegebenen konstanten Flüssigkeitsvolumenstrom zwangsläufig ein dickerer Film mit zunehmendem F-Faktor. Unklar ist jedoch, warum bei steigender Gasbelastung nur die Dicke der Perlen zunimmt, während die Dicke des Basisfilms tendenziell leicht abnimmt. Bei zunehmender Flüssigkeitsbelastung nimmt die Dicke der Perlen stärker zu als die Basisfilmdicke, wodurch ebenfalls eine zunehmende Verlagerung der Flüssigkeit in die Perlen erfolgt. Überschlägige Berechnungen haben ergeben, dass bei hohen Gas- und Flüssigkeitsbelastungen bis zu 80 % des Flüssigkeitsvolumenstroms durch die Perlen transportiert wird.

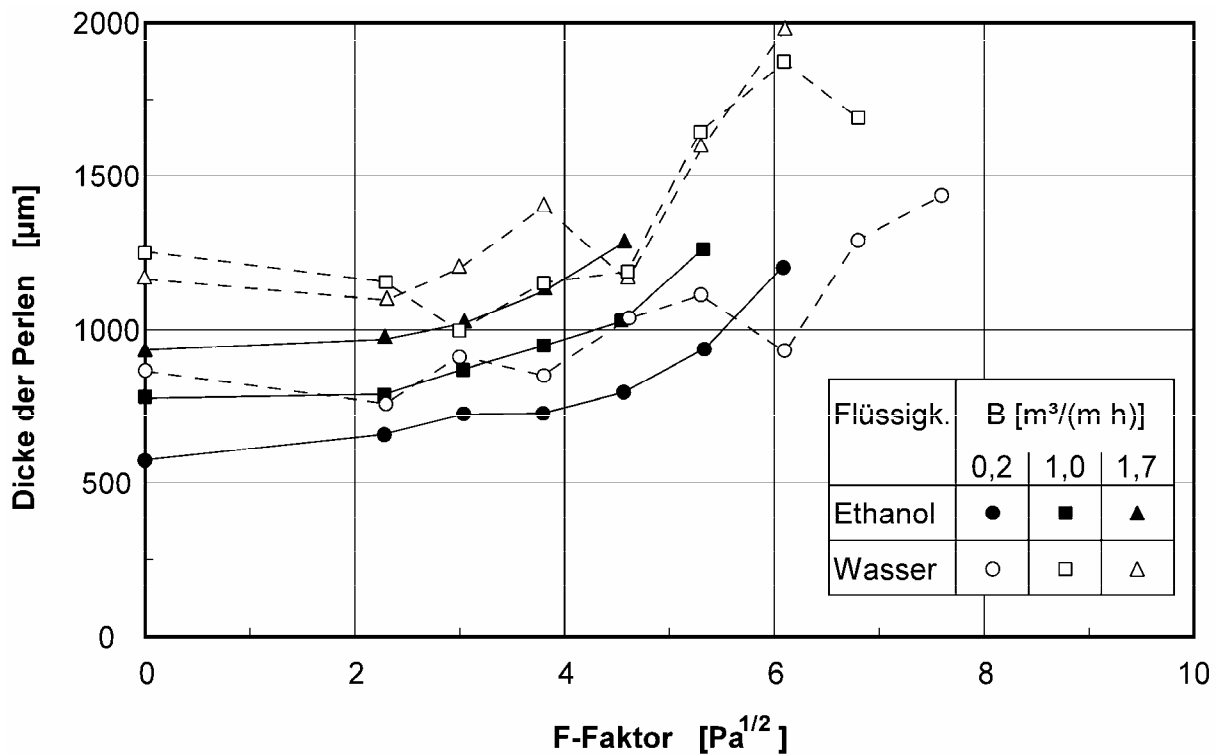


Abb. 7: Abhängigkeit der Dicke der Perlen von der Gasbelastung bei verschiedenen Umfangsbelastungen B für die Stoffsysteme Wasser/Luft und Ethanol/Luft

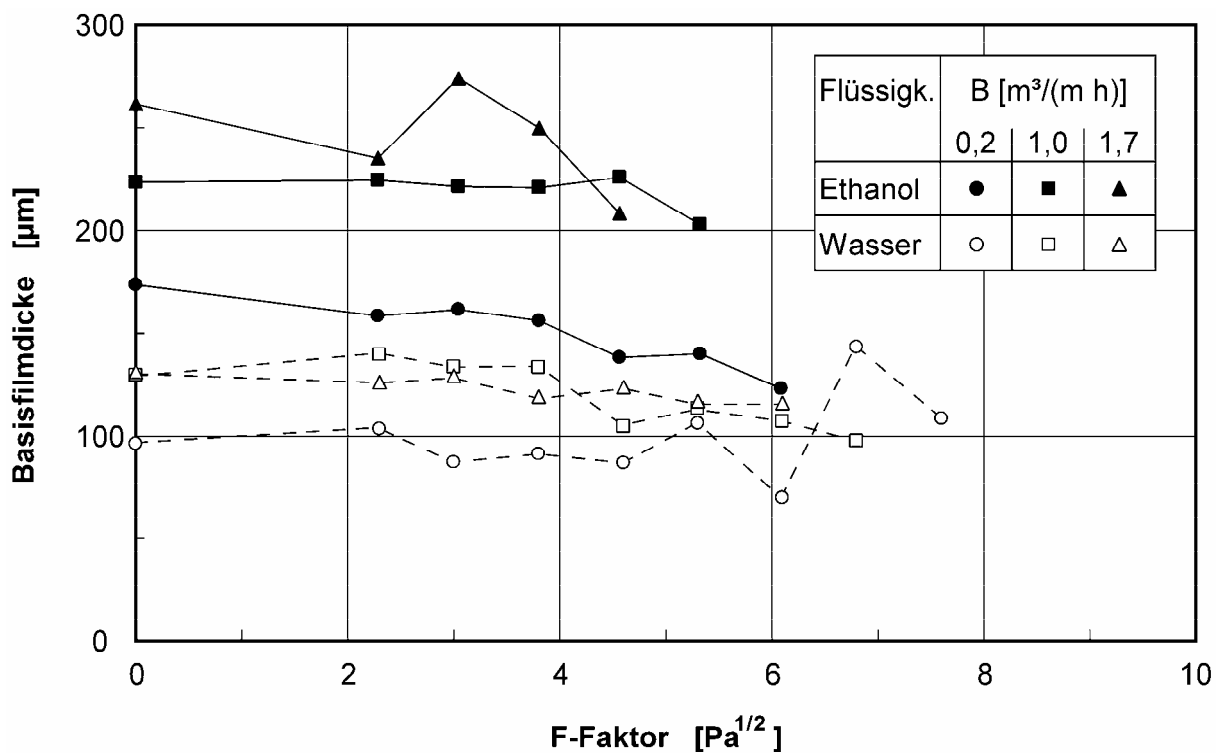


Abb. 8: Abhängigkeit der mittleren Dicke des Basisfilms von der Gasbelastung bei verschiedenen Umfangsbelastungen B für die Stoffsysteme Wasser/Luft und Ethanol/Luft

3.2 Belastungsgrenzen

In Abb. 9 werden die Belastungsgrenzen für die Stoffsysteme Luft/Wasser und Luft/Ethanol dargestellt. Hier sind jeweils die Flutgrenzen sowie jene Grenzen eingezeichnet, bei deren Überschreitung der Zerfall der Perlen beginnt. Zum Vergleich sind auch noch der Arbeitsbereich konventioneller Packungen und der Verlauf der Belastungsgrenze einer gegebenen strukturierten Packung dargestellt, die eine spezifische Oberfläche vergleichbarer Größenordnung aufweist. Die Daten dieser Packung wurden aus [6] für gleiche spezifische auf die Querschnittsfläche der Kolonne bezogene Flüssigkeitsbelastungen angepasst. Hierfür wurde ein Abstand der Drähte von 10 mm angenommen, was dem Abstand zwischen Draht und Wand entspricht. Es ist jedoch davon auszugehen, dass bei einer ausgeführten Packung ein geringerer Abstand der Drähte zueinander gewählt wird.

Zunächst erkennt man, dass die Belastungsgrenzen für die untersuchten Systeme über den gesamten Bereich der Flüssigkeitsbelastung höher liegen als die der konventionellen Packungen. Dies ist sicherlich auch auf die geradlinigere Strömungsführung und die geringere volumenbezogene Drahtoberfläche gegenüber konventionellen Packungen zurückzuführen. Es zeigen sich aber auch deutliche Unterschiede in den Belastungsgrenzen der beiden untersuchten Stoffsysteme. Sowohl die Flutgrenze, als auch die Grenze des Zerfalls der Perlen liegen beim Stoffsystem Luft/Wasser deutlich höher. Es wird angenommen, dass auch hier die Oberflächenspannung der ausschlaggebende Parameter ist.

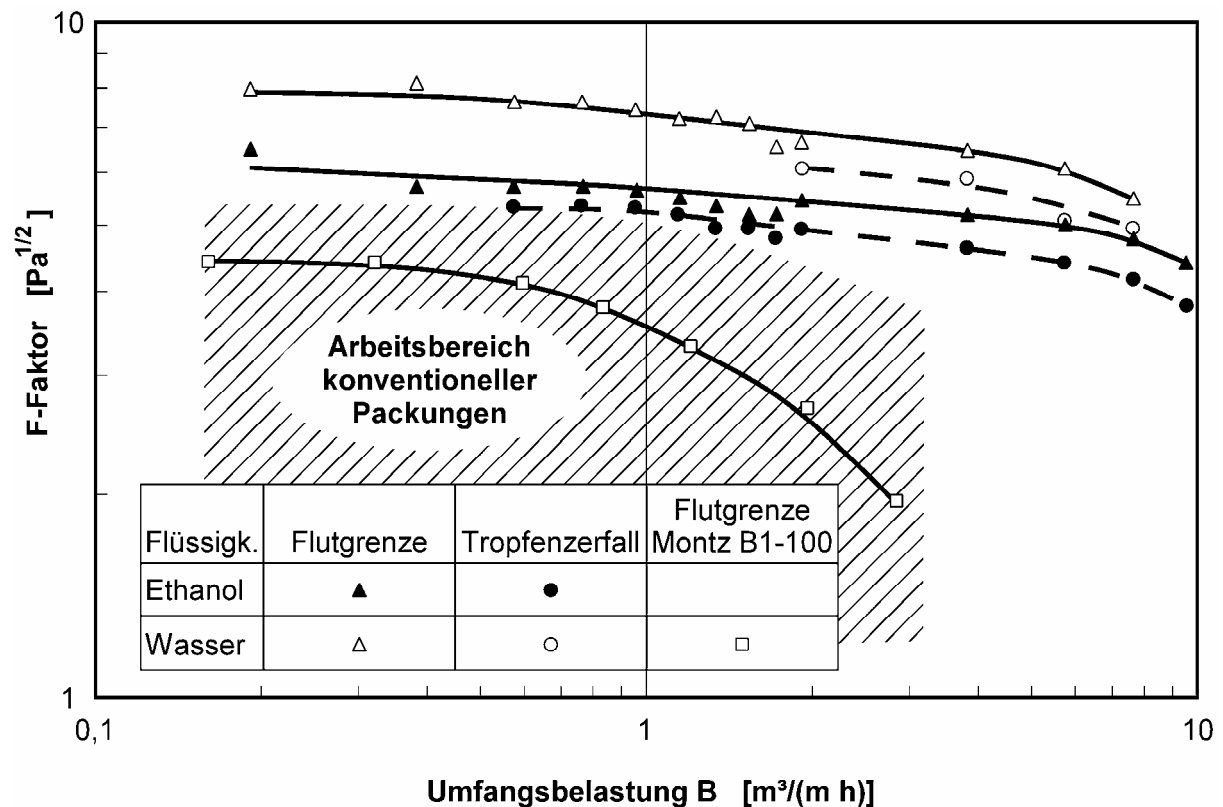


Abb. 9: Belastungsgrenzen für das Stoffsystem Wasser/Luft und Ethanol/Luft

4 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse der Filmdickenmessungen zeigen, dass die Umfangsbelastung und die Gasbelastung erwartungsgemäß deutliche Auswirkungen auf die Struktur des Flüssigkeitsfilms haben. Es lassen sich folgende Tendenzen erkennen:

- Zunehmende Gasbelastung führt zu einer Abnahme der Basisfilmdicke und zu einem Anstieg der Perlendicke, wobei die Frequenz der Perlen bei hohen Gasbelastungen verringert wird. Der Transport von Flüssigkeit verlagert sich immer mehr vom Basisfilm in die Perlen (bei hohen Belastungen bis zu 80 % des Flüssigkeitsvolumenstroms).
- Steigende Umfangsbelastungen führen zu einem Anstieg der Dicke des Basisfilms und der Perlen.
- Wasser bildet im Vergleich mit Ethanol einen dünneren Basisfilm bei gleichzeitig dickeren Perlen aus.

Die Untersuchungen der Belastungsgrenzen zeigen sehr hohe erreichbare F-Faktoren über einen breiten Betriebsbereich. Allerdings muss man berücksichtigen, dass sich bei einer Anordnung von mehreren parallelen vertikalen Drähten andere Strömungswiderstände für die Gasphase einstellen. Ersetzt man die Kanalwände durch eine Reihe von vertikalen Drähten, so wird die freie Querschnittsfläche durch den Flüssigkeitsfilm der benachbarten Drähte zusätzlich verengt, während der Widerstand der Wand auf die Gasströmung nicht mehr gegeben ist. Weiterhin ist der Einfluss der spezifischen inneren Oberfläche auf die Belastungsgrenzen unklar.

Es konnte ein Zerfall der Perlen durch den Einfluss der Gasströmung festgestellt werden. Der Zerfall wird als Beginn von Entrainment gewertet. Weil die Tochtertropfen beim Zerfall der Perlen mit dem Film an der Wand koaleszieren, werden sie nicht mit dem Gasstrom mitgerissen. Betrachtet man jedoch eine Konfiguration mit mehreren vertikalen Drähten, so ist nicht sicher, ob die Tochtertropfen auf die gleiche Weise mit dem Film an den benachbarten Drähten koaleszieren, oder ob sie weitere Tropfen aus dem Film herauschlagen.

Um letztendlich eine quantitative Aussage über die Effizienz des untersuchten Packungskonzepts treffen zu können, sind weitere Untersuchungen insbesondere zu folgenden Parametern erforderlich:

- auf die Drahtlänge bezogener Druckverlust,
- Flüssigkeitsinhalt (Holdup),
- Wärme- und Stofftransporteigenschaften und
- minimale Flüssigkeitsbelastung.

Die bislang gewonnenen Erkenntnisse lassen darauf schließen, dass das vorgestellte Konzept für hohe Gasdurchsätze besonders geeignet ist. Es könnte aber auch für den Einsatz von höherviskosen Flüssigkeiten durchaus sinnvoll sein.

Formelzeichen

A_K	[mm ²]	Querschnittsfläche des Glaskanals
B	[m ³ /(m h)]	Umfangsbelastung
d_D	[mm]	Drahtdurchmesser
F	[Pa ^{1/2}]	F-Faktor
f	[1/s]	Frequenz
r	[mm]	radiale Koordinate
U_D	[mm]	Drahtumfang
\dot{V}_g	[m ³ /h]	Gasvolumenstrom
\dot{V}_f	[mL/min]	Flüssigkeitsvolumenstrom
v_g	[m/s]	Gasleerrohrgeschwindigkeit
z	[mm]	vertikale Koordinate
η	[Pa s]	dynamische Viskosität
ρ	[kg/m ³]	Dichte
σ	[N/m]	Oberflächenspannung

Dipl.-Ing. J. Grünig

(jochen.gruenig@tu-berlin.de),

Prof. Dr.-Ing. M. Kraume,

Fachgebiet Verfahrenstechnik,
Technische Universität Berlin,
Ackerstraße 71-76, D-13355 Berlin, Germany.

Dipl.-Ing. A. Shilkin

BASF Aktiengesellschaft
D-67056 Ludwigshafen, Germany.

Literatur

- [1] H. Migita, K. Soga and Y. H. Mori, *AIChE J.* **2005**, *51* (8), 2190-2198.
- [2] H. E. Heidrich, Numerische Berechnung des Wärme- und Stoffübergangs an welligen Fallfilmen binärer Gemische, *Dissertation*, Technische Universität Berlin **2005**
- [3] K. Hattori, M. Ishikawa and Y. H. Mori, *AIChE J.* **1994**, *40* (12), 1983-1992.
- [4] H. Chinju, K. Uchiyama and Y. H. Mori, *AIChE J.* **2000**, *46* (5), 937-945.
- [5] *VDI-Wärmeatlas: Berechnungsblätter für den Wärmeübergang*, VDI-Verlag, Düsseldorf, **1994**
- [6] C. Wohlfarth and B. Wohlfarth, *Surface Tension of Pure Liquids and Binary Liquid Mixtures*, 8 ed., Landolt-Börnstein - Group IV Physical Chemistry, Vol. 16, Springer Verlag, **1997**.
- [7] Y. Y. Trifonov, *AIChE J.* **1992**, *38* (6), 821-834.
- [8] J. Mackowiak, *Fluidodynamik von Füllkörpern und Packungen*, 2 ed., Springer-Verlag, Berlin **2003**.