

2 Blasensäulen

Blasensäulen sind weitverbreitete industrielle Apparate, in denen eine Gasphase und eine Flüssigkeit in Kontakt gebracht werden, um gewöhnlich einen Stoffaustausch über die Phasengrenzfläche zu ermöglichen. Neben der reinen Zwei-Phasenströmung wie sie beispielsweise beim Strippen von leichtflüchtigen Substanzen vorkommt, treten bei der Nutzung von Blasensäulen zur Flotation und in den meisten Anwendungen als Gas-Flüssigkeitsreaktoren für chemische oder biologische Prozesse weitere Phasen in Form von dispergierten reaktiven oder katalytisch wirkenden Partikeln oder Organismen auf. Speziell beim Einsatz als Reaktoren zeichnen sich Blasensäulen durch ihren guten Wärme- und Stoffaustausch sowie ihre hohe thermische Stabilität aus (Deckwer 1985).

Blasensäulen werden als Behälter gebaut, deren Höhe meist die Breite übertrifft. Sie besitzen am Boden Begasungsorgane. Das Gas wird durch die Gasverteiler in die Kolonne gepresst, wodurch Blasen mit einer großen Phasengrenzfläche entstehen. Für die flüssige Phase besteht für einen kontinuierlichen Betrieb die Möglichkeit, sie im Gleich- oder im Gegenstrom zur Gasphase zu führen. Die einfache Bauweise ohne mechanisch bewegte Apparateile ist hierbei als wichtiger Vorteil der Blasensäulen zu werten.

In Blasensäulen treten zwei Strömungsregime auf, das homogene und das heterogene. Abhängig vom Gasverteiler, der Kolonnengeometrie und den Eigenschaften der Phasen können in einem Apparat beide Regime bei unterschiedlichen Gasvolumenströmen auftreten. Das homogene Regime ist durch eine einheitliche Blasengröße und einem über dem Kolonnenquerschnitt konstanten Gasgehalt gekennzeichnet. Die am Begaser entstehenden Blasen steigen scheinbar vertikal mit kleinskaligen axialen und transversalen Schwankungsbewegungen auf. Die Auswirkungen der Blasenkoaleszenz sind gering, sodass die Größe der Blasen und der Gasgehalt im wesentlichen von der Art des Begasers und den physikalischen Eigenschaften des Gas-Flüssigkeits-Systems abhängen. Außerhalb der Begasungszone werden keine großräumigen Zirkulationsströmungen beobachtet (Zahradnik et al. 1997).

Das heterogene Regime wird durch eine breite Blasengrößenverteilung und ein deutlich ausgeprägtes radiales Profil des Gasgehaltes charakterisiert. Ein Teil des Gases durchströmt das Bett in Form schnell aufsteigender Großblasen oder Agglomerate. Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmender Gasleerrohrgeschwindigkeit. Durch die ungleichmäßige Gasverteilung

werden großräumige Zirkulationen induziert, deren Geschwindigkeiten ein oder zwei Größenordnungen über der Gasleerrohrgeschwindigkeit liegen.

Wegen des grundsätzlich verschiedenen Strömungsverhaltens von Gas-Flüssigkeits-Reaktoren im homogenen und heterogenen Regime verändern sich auch die Eigenschaften des Stoff- und Wärmetransports, was Auswirkungen auf die Auslegung und den Betrieb solcher Apparate hat. Für eine rationelle Reaktorauslegung ist die Vorhersage der einzelnen Regime und ihres Übergangs von essenzieller Bedeutung. Das homogene Regime tritt bei geringen Gasleerrohrgeschwindigkeiten auf. Der Bereich des Übergangs zwischen dem homogenen und dem heterogenen Regime beginnt, wenn das homogene Regime mit zunehmender Gasleerrohrgeschwindigkeit seine Stabilität verliert. Der Übergang erfolgt allerdings nicht schlagartig, vielmehr stellt sich das heterogene Regime allmählich in immer größeren Bereichen der Apparatur ein.

In beiden Regimen kommt es in der Umgebung der sich bewegenden Blasen zu einem stark veränderten Geschwindigkeitsfeld der kontinuierlichen Phase, wodurch ein verstärkter Impulsaustausch bewirkt wird. Dieser Impulsaustausch, welcher als Schwarmturbulenz bezeichnet wird, wird durch einen der Blasenbewegung entgegen gerichteten Fluidstrom hervorgerufen und hängt in seiner Stärke von der Blasengröße und dem lokalen Gasgehalt ab.

2.1 Grundlegende Blaseneigenschaften

Fluide Teilchen besitzen keine starre Oberfläche. In Abhängigkeit von den Fluideigenschaften wie der Oberflächenspannung und dem Grad der Verschmutzung sowie durch die angreifenden fluidmechanischen Kräfte weichen Blasen von ihrer ideal sphärischen Form ab. Im Gegensatz zur Bewegung fester Teilchen ist die Bewegung von Blasen wesentlich durch ihre verformbare Oberfläche gekennzeichnet. Der Widerstandsbeiwert C_D von Blasen ist deshalb nur in Sonderfällen mit dem von sphärischen Partikeln vergleichbar.

2.1.1 Kennzahlen von Blasen

Zur Beschreibung und Einordnung von Blasen Zuständen wie Blasenform oder Aufstiegs- geschwindigkeit werden in der Literatur eine Reihe von Kennzahlen angegeben.

Die Reynoldszahl Re :

$$Re = \frac{w_B \cdot d_B \cdot \rho_L}{\eta_L} \quad (2.1)$$

beschreibt das Verhältnis von Trägheits- zu Reibungskräften. Die Geschwindigkeit w_B einer Blase mit dem äquivalenten Durchmesser d_B ist dabei die Relativgeschwindigkeit zwischen der Blase und der kontinuierlichen Phase mit der Dichte ρ_L und der dynamischen Viskosität η_L . Im Falle ruhender Flüssigkeit entspricht sie der Aufstiegs geschwindigkeit.

Die auch häufig bei Tropfen gebrauchte Weberzahl:

$$We = \frac{w_B^2 \cdot d_B \cdot \rho_L}{\sigma} \quad (2.2)$$

steht für das Verhältnis von Trägheits- zu angreifenden Oberflächenkräften, wobei hier zusätzlich die Oberflächenspannung σ als Parameter für die Stoffpaarung eingeht.

Die Mortonzahl

$$Mo = \frac{g \cdot \eta_L^4}{\rho_L \cdot \sigma^3} = \frac{We^3}{Re^4 \cdot Fr} \quad (2.3)$$

oft auch als Reziprokwert, der Fluidkennzahl:

$$K_F = \frac{1}{Mo} \quad (2.4)$$

benutzt, beschreibt die Stoffgrößen des Fluides in dimensionsloser Form.

Die *Froudezahl* ist als das Verhältnis von Trägheitskraft zu Gewichtskraft definiert:

$$Fr = \frac{w_B^2}{g \cdot d_B} \quad (2.5)$$

Eine letzte Kennzahl, die *Eötvöszahl* oder auch Bondzahl,

$$Eo = Bo = \frac{We}{Fr} \quad (2.6)$$

ergibt sich aus der Kombination von We und Fr und drückt somit das Verhältnis aus Oberflächenspannung und Gewichtskraft aus. Mittels Eo und Mo haben verschiedene Autoren (z.B. Clift et al. (1978)) versucht, die Form und das Bewegungsverhalten von fluiden Partikeln zu beschreiben (Abb. 2.1).

2.1.2 Aufstiegsverhalten von Blasen

Blasen unterhalb einer kritischen Größe besitzen Kugelgestalt. Mit steigender Blasengröße können die Oberflächenkräfte die angreifenden Strömungskräfte nicht mehr vollständig kompensieren und die Blasen beginnen abzulatten. Es ergeben sich Blasen, deren sphäroide Form sich bei der Bewegung durch ein Fluid periodisch ändert. Neben den in den Ähnlich-

keitskennzahlen zusammengefassten Eigenschaften der Gas- und Flüssigphase bestimmen auch die sogenannten oberflächenaktiven Substanzen, die sich aus dem Fluid an der Phasengrenzfläche der Blase ansammeln, sowie lokale Turbulenzstrukturen, wie stark die Blasen von ihrer sphäroiden und somit rotationssymmetrischen Form abweichen. Eine grobe Orientierung über die Formkategorien von Blasen gibt die zusammenfassende Darstellung aus Clift et al. (1978) in Abb. 2.1.

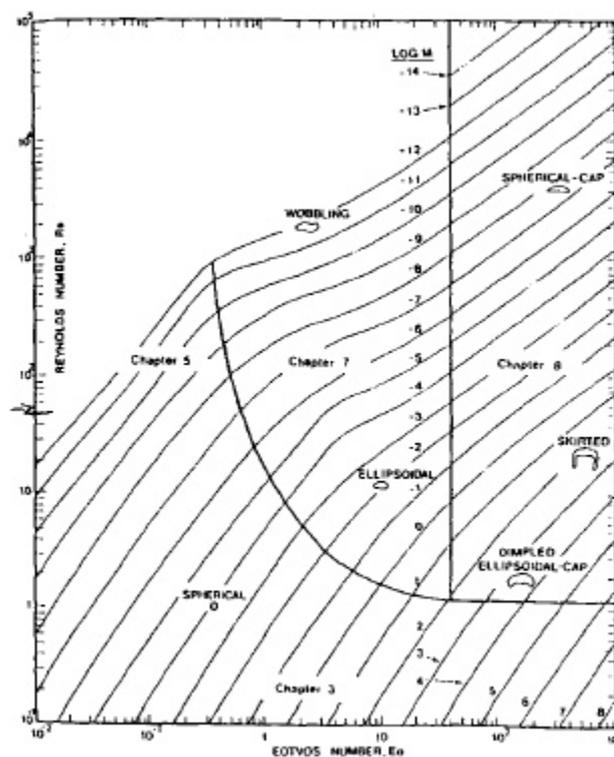


Abb. 2.1: Formkategorien von Blasen nach Clift et al. (1978).

Mit steigender Relativgeschwindigkeit erhöht sich die Trägheitskraft und in Folge dessen die Abflachung der Blasen. Die dabei auftretende Ausbildung und schließlich die Ablösung des Nachlaufs haben einen entscheidenden Einfluss auf die Sekundärbewegung der Blase. Die geradlinige Aufwärtsbewegung geht in eine Schaukelbewegung über, sodass die Bahn zickzack- oder spiralförmig wird. Diese Bewegung ist stets auch mit Formoszillationen verbunden, welche mit ansteigender Blasengröße an Amplitude und Modenzahl zunehmen. Die Ursache für das, gegenüber kleinen Blasen, geänderte Bewegungsverhalten liegt in der asymmetrischen Nachlaufablösung (Brücker 1999). Durch die einsetzende Nachlaufablösung wird ein Anstieg des Strömungswiderstandes der Blase bewirkt, welcher einher geht mit einem erhöhten Wärme- und Stoffübergang.

Die in der Literatur angegebenen Werte für die Aufstiegsgeschwindigkeiten von Luftblasen in Wasser weisen bisweilen erhebliche Abweichungen voneinander auf, welche von Clift et al. (1978) auf unterschiedliche Wasserqualitäten zurückgeführt werden. Clift et al. (1978) haben die ermittelten Aufstiegsgeschwindigkeiten von Einzelblasen in ruhender Flüssigkeit zusammengetragen, und als Funktion der Blasengröße dargestellt (Abb. 2.2). Es zeigt sich, dass die größten Abweichungen für äquivalente Blasendurchmesser von 0,7 bis 3 mm auftreten. In diesem Bereich haben Blasen eine sphärische bzw. sphäroide Form, es treten allerdings noch keine bzw. lediglich Formoszillationen niedriger Ordnung auf. Die Abweichungen der ermittelten Aufstiegsgeschwindigkeiten sind im wesentlichen auf eine Immobilisierung der Phasengrenzfläche durch die Kontamination mit oberflächenaktiven Substanzen zurückzuführen.

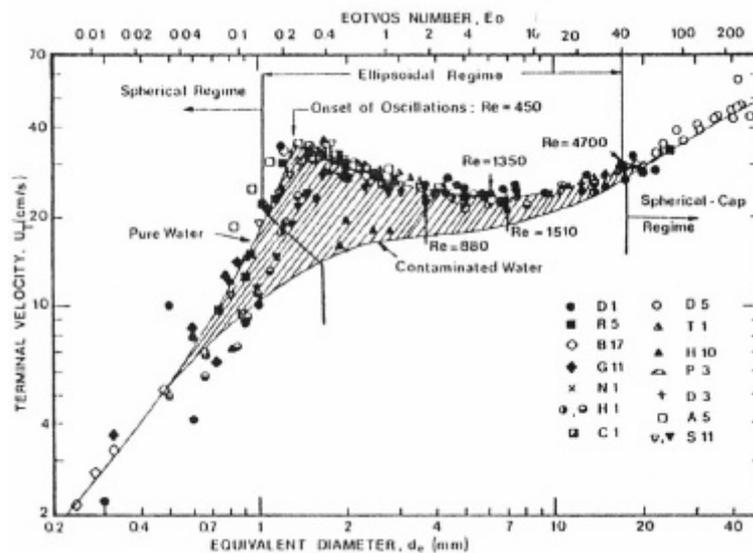


Abb. 2.2: Blasenauftstiegsgeschwindigkeit U_T in Abhängigkeit der Blasengröße in Wasser bei 20°C nach Clift et al. (1978).

Aus den stationären Aufstiegsgeschwindigkeiten von Einzelblasen in einem ruhenden Medium kann durch Aufstellen einer Bilanz der an den Blasen wirkenden Kräfte (Auftriebskraft F_A , Gewichtskraft F_G , Widerstandskraft F_W) der Widerstandsbeiwert ermittelt werden. Da die Kräfte parallel gerichtet sind, kann die Kräftebilanz in skalarer Schreibweise angegeben werden:

$$F_W = F_A - F_G \quad (2.7)$$

$$F_W = V_B \mathbf{r}_L \mathbf{g} - V_B \mathbf{r}_G \mathbf{g} \quad (2.8)$$

$$F_W = \frac{\rho \cdot g \cdot d_B^3}{6} (\mathbf{r}_L - \mathbf{r}_G) \quad (2.9)$$

Der Widerstandsbeiwert für eine Blase definiert sich dann als:

$$c_D = \frac{2 \cdot F_W}{A_S \cdot \mathbf{r}_L \cdot w_B^2} \quad (2.10)$$

Da besonders größere Blasen zu starken Formänderungen neigen, wird der Anströmquerschnitt A_S durch einen äquivalenten Durchmesser d_B ersetzt, wodurch sich folgende Beziehung für den Widerstandsbeiwert von Blasen ergibt:

$$c_D = \frac{4 \cdot d_B \cdot g}{3 \cdot w_B^2} \quad (2.11)$$

Der Widerstandsbeiwert lässt sich für verschiedene Bereiche der Re-Zahl angeben, wobei zusätzlich Blasen mit beweglicher und starrer Phasengrenzfläche (fluide/starre Blase) unterschieden werden. Starre Blasen verhalten sich in einem Bereich $Re < 200$ wie starre Kugeln. Für den Übergangsbereich $0,5 < Re < 1000$ kann dann folgender Widerstandsbeiwert angegeben werden:

$$c_D = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{Re^{2/3}}{6} \right) \quad (2.12)$$

Für Blasen mit beweglicher Phasengrenzfläche und innerer Zirkulation lassen sich folgende Bereiche unterteilen:

Formbeständige Kugelblasen ($Re < 1,5$), keine Trägheitskräfte, kein Ablösegebiet:

$$c_D = \frac{16}{Re} \quad (2.13)$$

Formbeständige Kugelblasen ($1,5 < Re < 80$), Einfluss von Trägheitskräften, noch keine Ablösegebiete:

$$c_D = 14,9 \cdot Re^{-0,78} \quad (2.14)$$

Formveränderliche Blasen ($80 < Re < 700$), Umströmung mit Ablösung, helixförmiger Aufstieg:

$$c_D = \frac{48}{Re} (1 - 2,21 \cdot Re^{-0,5}) \quad (2.15)$$

Formveränderliche Blasen ($700 < Re < 1530$)

$$c_D = 1,86 \cdot 10^{-15} \cdot Re^{4,756} \quad (2.16)$$

Formlose Blasen ($1530 < Re$), Umströmung mit Ablösung:

$$c_D = 2,61 \quad (2.17)$$

Die Widerstandsbeiwerte für Blasen mit beweglicher und starrer Phasengrenzfläche sind für das System Wasser/Luft zusammenfassend in Abb. 2.3 dargestellt. Der nicht stetige Verlauf des Widerstandsbeiwertes im Bereich $Re \approx 700$ verlangt bei numerischen Berechnungen Anpassungen zur Vermeidung von Stabilitätsproblemen. Auf Grund des bereits zuvor erwähnten Problems der Kontamination der Phasengrenzfläche durch oberflächenaktive Substanzen ist der Verlauf des Widerstandsbeiwerts zur Wiedergabe von Versuchsergebnissen durch numerische Berechnungen meist zwischen dem Verlauf für starre und dem für fluide Blasen anzupassen.

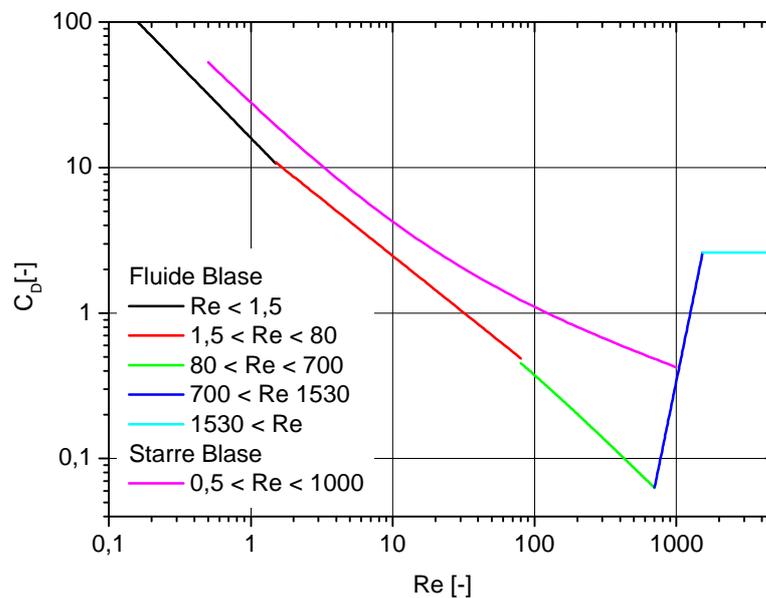


Abb. 2.3: Widerstandsbeiwert in Abhängigkeit der Re-Zahl für Luftblasen in Wasser.

2.1.3 Einfluss des Gasgehaltes auf die Relativgeschwindigkeit

Bei verfahrenstechnischen Prozessen treten im Allgemeinen keine Einzelblasen, sondern Blasenschwärme auf. Infolge dessen sind zusätzliche Einflüsse auf die Blasenbewegung vorhanden, die einen komplexen Charakter besitzen und nur schwierig erfassbar sind. Für Gasgehalte $< 0,25\%$ und mittlere Blasenabstände $> 6 d_B$ kann die gegenseitige Beeinflussung von Blasen vernachlässigt werden. Mit zunehmendem Gasgehalt kommt es zu einer Abnahme der Relativgeschwindigkeit zwischen den Blasen, welche durch die gegenseitige Behinderung der Bewegung der Blasen und die Abnahme des für die Flüssigkeit zur Verfügung stehenden freien Strömungsquerschnittes verursacht wird. In

Analogie zur Sedimentation werden für die Relativgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Gasgehaltes Beziehungen angegeben, welche erstmals von Richardson & Zaki (1954) für die Sinkgeschwindigkeit von festen Partikeln definiert wurden.

$$u_{rel} = U_T(1 - e_G)^n \quad (2.18)$$

Der Relativgeschwindigkeit für Blasen im Schwarm u_{rel} wird somit die Aufstiegs-
geschwindigkeit von Einzelblasen U_T zu Grunde gelegt. Für den Exponenten n geben Ishii &
Zuber (1979) den Wert 1,75 an.

Eine Abnahme der Relativgeschwindigkeit zwischen Blasen und Fluid konnten auch
durch direkte numerische Simulationen (DNS) wiedergeben werden (Bunner 2000). Innerhalb
dieser numerisch sehr aufwendigen Berechnungen werden die Navier-Stokes-Gleichungen
ohne zusätzliche Schließungsterme gelöst, sodass die Ergebnisse nicht durch unzählige
Modelle und Annahmen beeinflusst werden. Aufgrund ihrer Nähe zur Realität und der hohen
zeitlichen und räumlichen Auflösung werden diese Berechnungen häufig mit einem
„numerischen Experiment“ verglichen.

Für Gasgehalte im Bereich $1 < e_G < 5$ % wurden verschiedentlich Geschwindigkeits-
überhöhungen gegenüber den für Einzelblasen ermittelten Relativgeschwindigkeiten fest-
gestellt. Diese Geschwindigkeitsüberhöhungen werden auf die Bildung von Clustern zurück-
geführt, in denen es zwischen benachbarten Blasen zu hydrodynamischen Wechselwirkungen
kommt. Schlüter et al. (2001) konnten anhand der Messungen der lokalen
Schlupfgeschwindigkeit von Blasen im Schwarm zeigen, dass auch die Strömungsführung
einen Einfluss auf die Relativgeschwindigkeit hat. Während ihrer Untersuchungen in einem
Schlaufen-Strahl-Reaktor fanden die Autoren bei gleichem Gasgehalt ($e_G < 15$ %)
unterschiedliche Relativgeschwindigkeiten für eine Betriebsweise in Gleich- oder
Gegenstrom.

2.1.4 Gasdispersion und Blasenbildung

Bei der Auslegung von Blasensäulen kommt der Generierung von Blasen und somit dem
Begasersystem eine Schlüsselrolle zu. Zum einen wird durch die Art des verwendeten
Begasers entscheidend auf die Dispersion der Gasblasen Einfluss genommen, zum
anderen bestimmt die Begasergeometrie die Größe und somit die Form der Blasen. Im
Vordergrund steht zumeist die Schaffung einer möglichst großen Phasengrenzfläche.

Zur effektiven Dispergierung von Gasblasen haben sich neben statischen Begasern wie Membranen, Lochplatten oder einfachen Einsteckrohren dynamische Begaser etabliert. Einige Beispiele solcher Systeme zeigt Abb. 2.4. Ein Vorteil von dynamischen Begasern ist unter anderem die Fähigkeit, Kleinstblasen bzw. Primärblasen zu bilden. Dies geschieht, vereinfacht gesehen, auf Grund der hohen Dissipation der kinetischen Energie der Flüssigkeit am Düsenaustritt. Anschließende Koaleszenz führt zu größeren Blaseinheiten und zu einem Gleichgewichtsdurchmesser (Deckwer 1985).

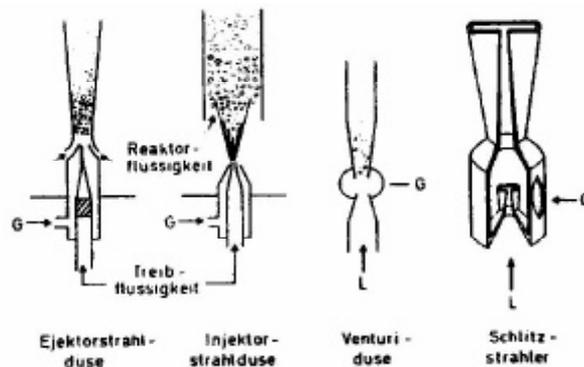


Abb. 2.4: Dynamische Begaser nach Deckwer (1985).

Beim Einleiten eines Gases in eine Flüssigkeit kommt es in Abhängigkeit des Gasvolumenstrom bzw. der Gasgeschwindigkeit im Austrittsquerschnitt zu unterschiedlichen Strömungszuständen. Hierbei werden die Regime des Blasengasen und des Strahlgasen unterschieden. Während beim Blasengasen sich deutlich von einander getrennter Blasen von der Austrittsöffnung ablösen, bildet sich beim Strahlgasen an der Austrittsöffnung ein zusammenhängenden Strahlkegel, welcher im weiteren Verlauf zu einzelnen Blasen zerfällt. Das Regime des Blasengasen tritt nur sich nur bei niedrigen Gasgeschwindigkeiten auf und geht mit steigender Gasgeschwindigkeit über eine Übergangsbereich mit relativ undefiniertem Strömungszustand in das Regime des Strahlgasen bei hohen Gasgeschwindigkeiten über.

Mit dem Problem der Blasenbildung haben sich zahlreiche Autoren beschäftigt. Eine Übersicht dazu findet man in Starke (1998). Bezüglich der Einflussgrößen auf die Blasenbildung können in folgende drei Kategorien unterschieden werden:

- **Geometrieparameter** wie Lochdurchmesser, Lochanzahl, Vorkammervolumen und Strömungsführung im Apparat,
- **Betriebsparameter** wie Gasdurchsatz, überlagerte Flüssigkeitsbewegung, Druck und Temperatur sowie

- **Stoffwerte** der jeweiligen Gas- und Flüssigkeitsphase.

Ein Schwerpunkt in der Auslegung und somit Gegenstand zahlreicher Untersuchungen ist der am Begasungsorgan entstehende Blasendurchmesser. Analytische Ansätze zur Vorausberechnung des Primärblasendurchmessers beruhen auf einem Kräftegleichgewicht, formuliert an einer kugelförmigen Einzelblase. Mersmann (1962) postulierte unter der Voraussetzung geringer Gasvolumenströme ein Abreißkriterium, mit dem die Blasengröße zum Abreißzeitpunkt berechnet werden kann. Unter der Annahme, dass bei sehr langsamer Blasenentstehung die umgebende Flüssigkeit nicht beschleunigt werden muss, wird zum Zeitpunkt des Blasenabrisses die Auftriebskraft:

$$F_A = \frac{\rho}{6} d_B^3 (\mathbf{r}_F - \mathbf{r}_G) g \quad (2.19)$$

der Summe aus Oberflächenspannungskraft :

$$F_s = \rho d_N \mathbf{s} \sin \mathbf{j} \quad (2.20)$$

und Widerstandskraft

$$F_w = \frac{\rho}{4} d_B^2 c_D \frac{\mathbf{r}_L w_B^2}{2} \quad (2.21)$$

gleichgesetzt. Wird weiterhin ein konstanter Widerstandsbeiwert angenommen, ergibt sich nach Rábiger (1984) folgender Ansatz für eine volumenäquivalente Blasengröße:

$$d_B = \sqrt[3]{\frac{3s d_N}{\mathbf{r}_L g} + \sqrt{\left(\frac{3s d_N}{\mathbf{r}_L g}\right)^2 + \frac{k_M \dot{V}^2 d_N}{g}}} \quad (2.22)$$

Hierbei steht d_N für den Kapillardurchmesser und \mathbf{s} bezeichnet die Oberflächenspannung. Der Faktor k_M berücksichtigt den Widerstandsbeiwert und einen Formfaktor auf Grund der Abweichung in der Blasengeometrie. Als Werte für k_M gibt Mersmann (1962) 10; 13,9 und 15 an. Weiterführende Ansätze berücksichtigen, dass auch ein Teil der die Blase umgebenden Flüssigkeit (virtuelle Masse) beschleunigt werden muss.

Kumar & Kuloor (1967) unterteilen die Blasenbildung weiterhin in zwei Stadien, das Expansionsstadium und das Ablösestadium (Abb. 2.5). Im ersten Stadium haftet die Blase an der Kapillarmündung, da rückhaltenden Kräfte stärker als die ablösenden Kräfte sind. Die Blase dehnt sich aus, Flüssigkeit wird verdrängt. Im zweiten Stadium löst sich die Blasenbasis von der Kapillaren ab, die Blase bleibt aber über einen Schlauch mit der Kapillare verbunden, wodurch weiterhin Gas in die Blase strömen kann. Als Abreißbedingung wird das Erreichen einer bestimmten Schlauchlänge z angenommen.

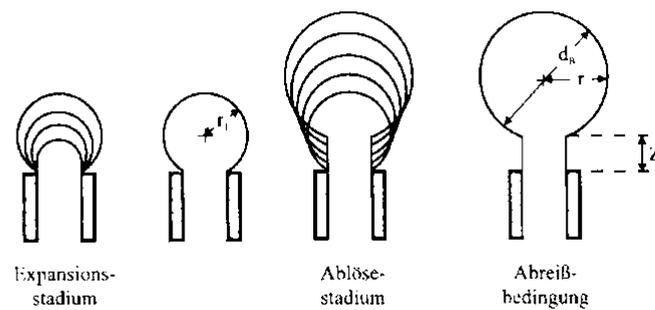


Abb. 2.5: Blasenbildung und Abreißbedingung nach dem Zwei-Stufen-Modell (Kumar & Kuloor 1967)

Nach Auswertungen von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und auf Grund der Messungen von Rübiger (1984) wird gezeigt, dass die Abreißlänge z mit hinreichender Genauigkeit als

$$z = \frac{d_B}{4} \quad (2.23)$$

angenommen werden kann.

In einem Viskositätsbereich von 0,001 bis 1 Pa s, für Weberzahlen von 0 bis 4 und Düsendurchmesser von 0,2 bis 6 mm sowie bei konstanten und geringen Gasdrücken wird folgende Gleichung abgeleitet:

$$d_B = \left[\left(\frac{6d_N \mathbf{s}}{r_L g} \right)^{\frac{4}{3}} + \left(\frac{8 \ln_L \dot{V}}{p g} \right) + \left(\frac{135 \dot{V}^2}{4 p^2 g} \right)^{\frac{4}{5}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.24)$$

Für n_L geht die kinematische Viskosität in die Gleichung ein. Sie setzt sich zusammen als Quotient aus dynamischer Viskosität h und der Dichte r_L .

In den meisten Modellen nicht erfasst, werden die in der Praxis häufig anzutreffende Wechselwirkung mit benachbarten Blasenaustrittsöffnungen sowie die spezifische Fluidanströmung um die Blasen.

2.2 Methoden zur Bestimmung des lokalen Gasgehaltes

Lokale Gasgehalte von Blasenströmungen in verfahrenstechnischen Apparaten weichen in aller Regel erheblich von einem integral, für das gesamte Apparatvolumen bestimmten Gasgehalt ab. Die Gründe dafür sind der Stoffübergang an den Blasen und der sich ändernde hydrodynamische Druck in hohen Apparaten, welcher je nach Bewegungsrichtung der Blasen

zu einer Kompression oder Expansion der Blasen führt. Der integrale Gasgehalt $e_{G,int}$, also der Quotient zwischen dem Gasvolumen V_G und Reaktionsvolumen, kann in einfachster Weise durch eine Bestimmung der Höhe der Wassersäule im begasten H_B und im unbegasten Zustand H_L ermittelt werden:

$$\mathbf{e}_{G,int} = \frac{V_G}{V_G + V_L} = \frac{H_B - H_L}{H_B} \quad (2.25)$$

Da diese Methode das Abschalten des Gasstroms erfordert, ist sie für eine kontinuierliche Prozessüberwachung nicht geeignet. Dennoch wird diese Methode in Laboren und Technika häufig zur Bestimmung des Übergangs vom homogenen in das heterogene Regime genutzt (Abb. 2.6), da sie keine aufwendige Messtechnik erfordert.

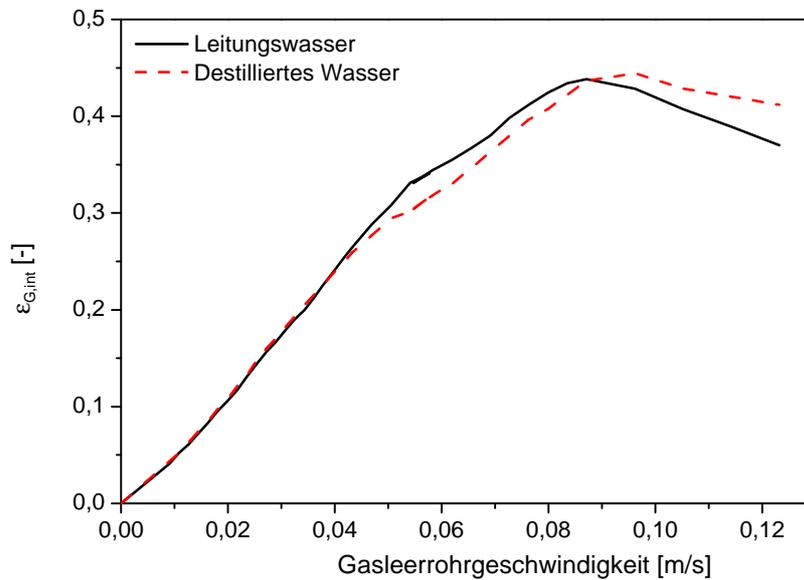


Abb. 2.6: Integraler Gasgehalt in Abhängigkeit der Gasleerrohrgeschwindigkeit für eine Laborblasensäule. $H_L=400$ mm. Der Übergang zwischen dem homogenem und dem heterogenem Regime erfolgt hier bei einer Gasleerrohrgeschwindigkeit von etwa 0,05 m/s. Der integrale Gasgehalt nimmt von da an nicht mehr linear mit dem Gasvolumenstrom zu.

Eine Messung des Differenzdruck $\mathbf{D}p=p(h_2)-p(h_1)$ zwischen zwei Messstellen mit dem Abstand $\Delta h=h_2-h_1$ führt bei bekannter Dichte der Flüssigkeit \mathbf{r}_L zur Bestimmung des Gasgehaltes, welcher je nach Position bzw. Distanz der Messstellen sowohl als integral als auch als lokal bezeichnet werden kann.

$$\mathbf{e}_G(h) = 1 - \frac{\Delta p}{\mathbf{r}_L g \Delta h} \quad (2.26)$$

Hierbei befindet sich die Position $h=(h_1+h_2)/2$ in der Mitte zwischen beiden Messstellen. Die Methode ist somit nur geeignet eine axiale bzw. vertikale Änderungen des Gasgehaltes erfassen.

Durch die Erfassung lokaler Blasengeschwindigkeiten und des eingebrachten Gasvolumenstroms \dot{V}_G ergibt sich bei Vernachlässigung des Stofftransportes über die Phasengrenzfläche eine weitere Methode zur Bestimmung lokaler Gasgehalte. Hierbei entspricht der Gasgehalt dem Quotienten aus der Gasleerrohrgeschwindigkeit U_{SG} und der radial bzw. horizontal gemittelten Geschwindigkeit der Blasen $U_{BP}(h)$ eines Messprofils an der Stelle h .

$$\mathbf{e}_G(h) = \frac{U_{SG}(h)}{U_{BP}(h)} \quad (2.27)$$

Da im Falle von Untersuchungen der reinen Hydrodynamik am Luft/Wasser-System zwar der Stoffaustausch nach einer Sättigung, nicht aber die Änderung des Gasvolumens auf Grund unterschiedlicher hydrostatischer Drücke vernachlässigt werden kann, ist der Gasvolumenstrom und damit die Gasleerrohrgeschwindigkeit U_{SG} abhängig von der vertikalen Position h in der Apparatur

$$U_{SG}(h) = \frac{\dot{V}_G(h)}{A_L} \quad (2.28)$$

Bei normalen Umgebungsbedingungen kann das Gesetz der idealen Gase zur Bestimmung des lokalen Gasvolumenstroms angewandt werden:

$$\dot{V}_G(h) = \frac{p(0)}{p(h)} \dot{V}_G(0) \quad (2.29)$$

wobei für geringe Gasgehalte der hydrostatische Druck $p(h)$ näherungsweise durch:

$$p(h) = p_0 + \mathbf{r}_L g (h_{ws} - h) \quad (2.30)$$

angegeben werden kann.

Bei Anwendungen in zylindrischen Blasensäulen ist die horizontal gemittelte Geschwindigkeit der Blasen $U_{BP}(h)$ eines Messprofils an der Stelle h mit einer Gewichtung der Messorte gemäß der Fläche ihrer korrespondierenden Kreisringflächen zu ermitteln. Solch ein Mittelwert für radiale Profile mit den Messwerten u_i an den Positionen r_i kann bei äquidistanter Abtastung und entsprechend konstanter Breite b der Kreisringe wie folgt berechnet werden:

$$\bar{U} = \frac{\sum A_i u_i}{\sum A_i} = \frac{\sum \left[\left(r_i + \frac{b}{2} \right)^2 - \left(r_i - \frac{b}{2} \right)^2 \right] 2p u_i}{\sum A_i} = \frac{\sum 2p b r_i u_i}{\sum 2p b r_i} = \frac{\sum r_i u_i}{\sum r_i} \quad (2.31)$$

In Abb. 2.7 ist ein Vergleich dargestellt zwischen dem lokalen Gasgehalte e_G , der durch Messung der mittleren Blasengeschwindigkeit eines Querschnitts in einer Höhe von 1400 mm über dem Begaser ermittelt wurde, und dem integralen Gasgehalte $e_{G,int}$ der durch Messung der Höhe des begasten und unbegasten Wasserspiegels bestimmt wurde. Für sehr niedrige Gasleerrohrgeschwindigkeiten U_{SG} ergeben sich noch sehr gute Übereinstimmungen zwischen $e_{G,int}$ und e_G . Mit steigender U_{SG} nimmt der lokale Gasgehalt im oberen Teil der Kolonne stärker zu als der integrale Gasgehalt der Kolonne. Da die Strömungsprofile im oberen Bereich der Kolonne stark abflachen und die Blasen dort homogen über den gesamten Querschnitt der Blasensäule dispergiert sind, sind die über den Querschnitt gemittelten Blasengeschwindigkeiten dort niedriger als im unteren Teil der Blasensäule und dem entsprechend ist der lokale Gasgehalt dort höher.

Weitere Methoden zur Bestimmung lokaler Gasgehalte ergeben sich durch diverse Sondentechniken, die hier nur kurz im Überblick dargestellt werden sollen. Bei den meisten dieser Sondenmesstechniken erzeugen Blasen beim Durchtritt durch den Messort ein charakteristisches Signal, welches durch eine Auswertelektronik hinsichtlich der Verweilzeit der Blase am Messort analysiert wird. Der lokale Gasgehalt kann dann aus dem Quotient der Summe der Verweilzeiten t_i und der gesamten Messdauer T_M bestimmt werden:

$$\mathbf{e}_G = \frac{\sum_{i=1}^{N_S} t_i}{T_M} \quad (2.32)$$

Die Hitzdrahtanemometrie nutzt den stark unterschiedlichen Wärmeübergang in Wasser und Luft, um die Verweilzeit von Blasen im Messvolumen zu erfassen. Um eine gute Phasendiskriminierung zu gewährleisten, sind zum Teil aufwendige Techniken zur Signalverarbeitung notwendig. Neueste Entwicklungen auf dem Gebiet der Auswertung der Signale wurden von Luther et al. (2002) vorgestellt. Durch die Anwendungen von Wavelet-Techniken und Algorithmen der Mustererkennung konnte eine sehr gute Phasendiskriminierung erreicht werden.

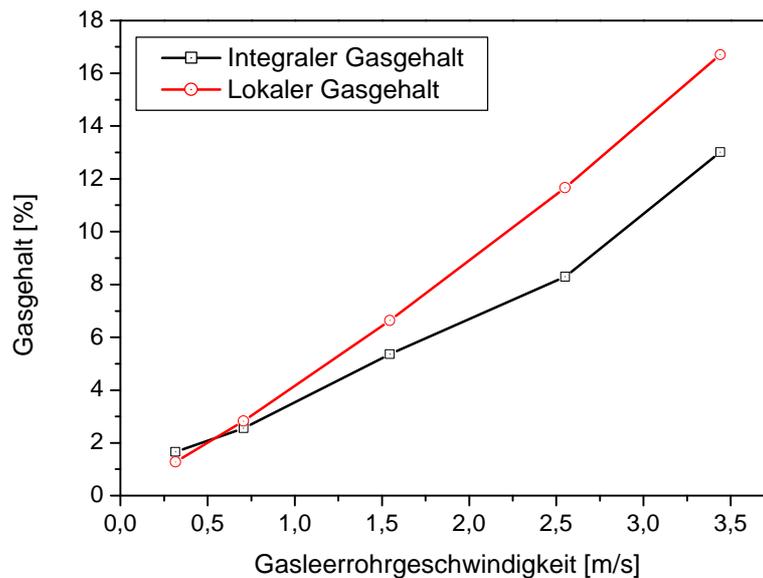


Abb. 2.7: Abhängigkeit des Gasgehaltes von der Gasleerrohrgeschwindigkeit in der Laborblasensäule ($H_L=1400$ mm, Begasung durch Membran). Bestimmung des integralen Gasgehaltes durch Messung der Höhe des Wasserspiegels. Bestimmung des lokalen Gasgehaltes in einer Höhe von 1000 mm über dem Begaser durch Messung der Blasengeschwindigkeit und des Gasvolumenstroms.

Glasfasersonden sind an ihrer Spitze so dünn gefertigt ($d \sim 10$ μm), dass sie aufsteigende Gasblasen ohne nennenswerte Beeinflussung der Blasenbewegung durchstechen. In die Glasfasern wird das Licht eines Lasers eingekoppelt. Dieses wird an der Spitze der Sonde reflektiert. Durch die unterschiedlichen Brechungsindices von Flüssigkeiten und Gasen ändert sich die Intensität des reflektierten Lichts beim Durchstechen von Blasen. Durch die Kombination zweier eng beieinander angeordneter Fasern, die in unterschiedlichen Höhen enden, können zudem die Aufstiegs geschwindigkeit und die Sehnenlängen von Blasen erfasst werden. Um darüber hinaus Aussagen über die Form der Blasen machen zu können, wurde die Methode kürzlich von Rensen et al. (2002) auf vier Fasern erweitert. Allerdings setzt dieses Verfahren eine elliptische Form der Blasen voraus.

Mittels der Time-Domain-Reflektometrie konnten Dziallas et al. (2000) neben dem Gasgehalt noch zusätzlich den Gehalt einer dritten, festen Phase bestimmen. Mittels dieser Technik war es möglich, die lokalen Verteilungen der einzelnen Phasen in einer dreiphasig betriebenen Blasensäule im Technikumsmaßstab bei verschiedenen Betriebsbedingungen zu untersuchen.

Eine besonders hochauflösende Methode zur Bestimmung lokaler Gasgehalte ist der von Prasser et al. (2000) entwickelte tomographische Gittersensor (Wire Mesh Sensor). Diese Methode beruht auf einer sehr schnellen Leitfähigkeitsmessung zwischen zwei Ebenen mit parallel gespannten Drähten. Die Drahtreihen der Ebenen sind zueinander gekreuzt angeordnet, sodass die Anwesenheit der Gasphase an den Messpunkten die Leitfähigkeit reduziert. Diese wird hochfrequent abgetastet, sodass in dem zwischen den Drähten liegenden Volumen nahezu instantan der Gasgehalt bestimmt werden kann. Die enorme Geschwindigkeit des Systems erlaubt die Abtastung einer Ebene mit bis zu 10000 Hz, wodurch neben der bloßen Bestimmung des Gasgehaltes die Form und Struktur von Blasen wiedergegeben werden kann. Eine axiale Anordnung zweier Gittersensoren erlaubt neben der Blasengröße und dem lokalen Gasgehalt auch die Messung der Blasengeschwindigkeit, welche sich bei bekanntem Abstand der Gittersensoren aus einer Kreuzkorrelation der Sensorsignale ergibt. Allerdings setzt die Anwendung des Gittersensors eine minimale überlagerte Flüssigkeitsbewegung voraus, da zu geringe Blasengeschwindigkeiten zu Verformungen der Blasen beim Auftreffen auf das Gitter führen. Auch beeinflussen in die Strömung eingebrachte Gittersensoren die Blasengrößenverteilung, wodurch die simultane Anwendung von mehreren Gittersensoren zur Untersuchung der axialen Änderung von Blasengrößenverteilungen nicht möglich ist. Die Auflösung des Gittersensors ist durch den Gitterabstand des Sensors beschränkt, da Blasen kleiner als der Gitterabstand nicht mehr richtig erfasst werden können.

Zur berührungslosen Bestimmung lokaler Gasgehalte wurden einige Entwicklungen gemacht, welche die Absorption von Röntgen- oder Gamma-Strahlung in der Zwei-Phasenströmung und tomographische Auswertetechniken nutzen. So konnte Samstag (1996) die axiale Entwicklung radialer Gasgehaltsprofile in einem Rohr von 70 mm Durchmesser bei verschiedenen überlagerten Wassergeschwindigkeiten, mittleren Gasgehalten und Begaserkonfigurationen bestimmen. Allerdings war das verwendete tomographische Aufnahmesystem, bestehend aus einer Röntgenquelle und 63 Miniatur-Geiger-Müller-Zählrohren nicht in der Lage instantane tomographische Rekonstruktionen des lokalen Gasgehaltes zu liefern, da das Aufnahmesystem für die 120 benötigten Projektionen relativ langsam um das Rohr bewegt werden musste.

Die neueste Entwicklung eines schnell abtastenden Röntgentomatographen stellt das von Misawa et al. (2003) entwickelte System dar, welches aus gepulst betriebenen Röntgenquellen und mehreren Zeilensensoren besteht. Mit dieser Entwicklung ist es auf

Grund der hochfrequenten Abtastung des Messvolumens möglich, neben der bloßen Bestimmung des Gasgehaltes, durch tomographische Rekonstruktion sogar die Form und Position von Blasen zu ermitteln. Vergleichende Messungen mit dem von Prasser et al. (2000) entwickelten tomographischen Gittersensor ergaben sehr gute Übereinstimmungen für die ermittelten Gasgehalte, deren räumliche Verteilung und sogar die Auflösung einzelner Blasen.

Neben den berührungslosen Messtechniken, welche den Einsatz von Röntgen- oder Gammastrahlung erfordern, gibt es noch kameraoptische Methoden, wie die kürzlich von Murai et al. 2001 vorgestellte, und Techniken mit Einsatz von Ultraschall wie der Ultraschallblasenanalysator, auf die hier nicht näher eingegangen wird.