

3 Theoretische Untersuchungen von Resonanzschwingungen

3.1 Einfluss von Schwingungen auf den Stoffaustauschprozess

Viele Vorrichtungen, wie zum Beispiel Hochleistungsrührwerke, statische Mischer und Blasensäulen, wurden bereits dazu benutzt, den Stoffübergang vom Gas zur Flüssigkeit zu erhöhen. Einer der einfachsten und gebräuchlichsten Kontaktapparate ist die Blasensäule. Diese besteht aus einem mit Flüssigkeit gefüllten Rohr, in das Gas eingeblasen wird. Das Verhalten des Stoffüberganges in Blasensäulen ist bereits ausreichend untersucht und dokumentiert. Deckwer's Korrelation [70], die auch von Shah et. al. [42] empfohlen wird, wird allgemein benutzt, um Übertragungskoeffizienten vorauszusagen.

Innere und äußere Schlaufenreaktoren, untersucht von Chisti [43] sind eine komplexere Form von Blasensäulen. Man unterscheidet zwischen den Typen Spaltzylinderrohr und Spaltzugrohr. Das Grundprinzip der Wirkungsweise ist, dass die Größe der Dichteunterschiede in der Zweiphasendispersion von der Position des Gasverteilers abhängt, welcher gleichzeitig die Zirkulation der Flüssigkeit antreibt.

Stoffübergangsmessungen wurden von Lewis und Davidson [44] an äußeren Schlaufenreaktoren und von Chisti [43] auch an inneren durchgeführt. Der Gas-Flüssigkeits-Stoffübergang wurde ohne Verwendung von mechanischen Rührern mit steigendem Volumenanteil der Blasen verbessert.

Der am meisten verbreitet benutzte Behälter, der den Stoffübergang mit mechanischen Hilfen verbessert, gebraucht Rührer und Gasverteiler.

Calderbank [45] untersuchte und wies Korrelationen für die Grenzfläche bezüglich des Energieverbrauches nach. Linek und seine Mitarbeiter [46] gaben eine Beziehung zwischen dem Stoffübergang, der Energie, der Dichte und der äußeren Gasgeschwindigkeit an.

Schwingung ist auch eine Form, eine Flüssigkeit aufzurühren. Baird und Garstang [48] führten Untersuchungen mit Schwingungen mit dem Resultat durch, dass sich der Stoffübergang vom Gas zur Flüssigkeit erhöht hat. Bellhouse et. al. [49] benutzten die Schwingungen in unebenen Kanälen, um den Blutsauerstoff anzureichern. Knott und Mackley [50] bemerkten entlang der Strömung an scharfen Ecken in schwingenden Systemen Wirbelbildungen. Diese Arbeit wurde von Brunold et. al. [51] erweitert, indem ein U-Rohr mit rechtwinkligen Biegungen und Trennwänden benutzt wurde.

Die Trennwände wurden eingesetzt, um die scharfen Ecken zu simulieren. Die Anderen fanden heraus, dass für gute Wechselwirkungen der Wirbel für die Abstände der Umlenkbleche das 1,5-fache des Rohrdurchmessers optimal wäre.

Dickens et. al. [41] untersuchten das Ort-Zeit-Verhalten von schwingenden Strömungen in einem Rohr mit Umlenkblechen mit der optimalen Geometrie von Brunold et. al. [51]. Sie haben herausgefunden, dass die Vorrichtung, wenn diese mit einer Art Pfropfenströmung betrieben werden könnte, eine effiziente radiale Mischung liefert. Außerdem intensiviert sich die Mischung innerhalb des Hohlraums, wenn man die Frequenz und die Amplitude erhöht.

Baird und Garstang [47] haben durch Experimente mit pulsierenden Gas-Flüssigkeitsgemischen gezeigt, dass sich mit regulär verteilten Abständen zentral laufender Umlenkbleche ein dreifacher Anstieg des gaseitigen Volumenanteils ergab. Es wurde auch ein dreifacher Anstieg des Stoffüberganges für Hochfrequenz- und Amplitudenschwingungen festgestellt.

Die Aufgabe von niederfrequenten Schwingungen auf verfahrenstechnische Systeme ist bekannt bei der Gegenstromführung von zwei nicht mischbaren Flüssigkeiten in der kontinuierlichen Extraktion, wobei die oszillierenden Bewegungen durch Kolbenpumpen, vibrierende Membranen oder Siebböden erzeugt werden [73].

Es werden die Vorteile in der sehr guten Stoffübertragung und im hohen spezifischen Durchsatz gesehen, während als Nachteil der größere Aufwand im Vergleich zu Extraktoren mit rotierenden Einbauten und die Eignung nur für kleine Apparatedurchmesser hervorgehoben werden. Für Gas-Flüssigkeitssysteme beschrieb Brauer [74] den Hubstrahlreaktor als Gasdispergiermaschine, die für den Sauerstofftrag ein Vielfaches dessen von Oberflächenbelüftern und der Turmbiologie leistet. Diese Maschine arbeitet mit im Apparat angeordneten Lochscheiben, die sich senkrecht mit einer Frequenz von 1Hz und einer Amplitude von 100 mm hin und her bewegen.

Zadorski und Shalakman [75] untersuchten Ventilböden von Kolonnen, bei denen man unter normalen Betriebsbedingungen spontane Vibration der Ventilkappen beobachten kann. Sie stellten fest, dass der Stoffaustauschkoeffizient an der Phasengrenze Gas-Flüssigkeit merklich von den Frequenzen und Amplituden der Schwingungen abhängt, und empfehlen für den Betrieb die Ventilfequenz so zu wählen, dass sie nahe der Eigenfrequenz des Gas-Flüssigkeits-Systems liegt.

Ostrovsky und Mitarbeiter [76] berichteten über Schwingungsapparate im Resonanzregime. Als wesentlicher Vorteil gegenüber Schwingungen im Nichtresonanzregime wird die Verringerung des Energieaufwandes um eine Zehnerpotenz hervorgehoben. Außerdem vereinfacht sich die Konstruktion der Energieübertragung am effektivsten mit Schwingungen. Bei hohen Frequenzen (bis zur Größenordnung einiger 10 Hz) verlaufen die Prozesse der Masse- und Energieübertragung am effektivsten. Es wurden als Modell zwei Kolonnen betrachtet, wobei eine Kolonne mit Wasser gefüllt war und die andere Kolonne am Boden ein Gaspolster hatte, das durch einen elastischen Körper von der Flüssigkeit getrennt war. Beide Flüssigkeiten wurden mit einem Pulsator seitlich periodisch bewegt.

Im ersten Fall wurde für ein Beispiel mit einer Wasserhöhe von 1 m eine Eigenfrequenz bzw. Resonanzfrequenz von $f_R = 400$ Hz berechnet. Eine gezielte Veränderung der Resonanzfrequenz kann dadurch erfolgen, dass elastische Glieder, z B. in Form von Luftpolstern, geschaffen werden. Flüssigkeit und Gas bilden somit ein völlig neues schwingungsfähiges System. Die Eigenfrequenz liegt bei einigen Hertz. Für die Experimente wurde eine Versuchseinrichtung genutzt. Es wurden verschiedene Versuche zur Beschreibung des Resonanzverhaltens durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass die Eigenfrequenz des schwingungsfähigen Systems vom Luft- und Wasservolumen abhängig ist und nach folgender Gleichung berechnet werden kann:

$$f_R \approx \frac{1}{2\pi} \left(\frac{P^* + \rho_L g h_L}{\rho_L h_L V / A_S} \right)^{0.5} \quad (3.1)$$

Für die Bestimmung der Stoffübergangskoeffizienten in Gas-Flüssigkeitssystemen wurde Natriumsulfit oxidiert und eine zehnfache Erhöhung des Stoffdurchganges im Resonanzregime festgestellt.

Die technische Nutzung von Resonanzschwingungen in der Verfahrenstechnik ist eine sehr anspruchsvolle Aufgabe. Eine systematische und sachkundige Entwicklung dieser neuen Technik besitzt ein sehr hohes innovatives und ökonomisches Potential [114].

Hatami [77] beschäftigte sich mit dem Flüssig-Gas-System. Sein Ziel war es, die Reaktionszeiten in Blasensäulen durch Schwingungen zu verkürzen. Für seine Untersuchungen nutzte er eine Blasensäule mit mehreren Siebböden. Der mechanische Erreger war ein stufenlos regelbarer Hydraulikmotor, der unterhalb des Siebbodens

eine kreisförmige Platte drehte. Mit den aufgebrachten Schwingungen war es möglich, die Reaktionszeit in einem chemischen Reaktor zu verkürzen.

Ostrovsky und Mitarbeiter [76] führten experimentelle Untersuchungen am Blasenverhalten in Flüssigkeitssäulen durch. Sie beobachteten, dass sich die Blasen unter Aufbringung von Schwingungen im Resonanzregime einander annähern und zum Teil vereinigen. Außerdem stellen sie eine Verlangsamung der Aufstiegsgeschwindigkeit fest, die auch negative Werte annahm.

Keiji Yasuda et. al. [115] führten Versuche an Schlaufenreaktoren und Blasensäulen durch. Ihr Ziel war eine Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit. Als Schwingungserreger benutzte er Ultraschallwellen mit 510 kHz. Er hat festgestellt, dass durch Verkleinerung der Blasengröße primär die Mischungszeit verkürzt und dadurch auch die Reaktionsgeschwindigkeit im Gas-Flüssigkeitsgemisch gesteigert werden kann.

Nach Forner und Großer [116] konnte bei kleineren Frequenzen als 5 Hz keine Steigerung des Stoffübergangs nachgewiesen werden, während bei höheren Frequenzen und Amplituden der Schwingung die übergehende Stoffmenge ansteigt.

Über ein Ionenaustauschersystem mit Schwingungen berichtete Mak [78]. In einer pulsierten Packungskolonne wurde der Stofftransport zwischen Kationenaustauscherpartikeln, die in der Kolonne nach unten rieseln, und einer im Gegenstrom geführten Kaliumhydroxidlösung untersucht. Die Schwingungen wurden in der die Flüssigkeit zuführenden Rohrleitung erzeugt. Der Frequenzbereich lag zwischen 0 und 2,4 Hz bei Kolbenhüben von 0 bis 15 mm. Es wurde festgestellt, dass durch Schwingungen der Flüssigkeit die Dispersion der Feststoffpartikel verbessert wird und damit auch der Stoffübergangskoeffizient.

Aboukhres [79] beschäftigte sich mit dem Einfluss niederfrequenter Fluidschwingungen auf die Nickelentfernung aus Prozesswasser. Er untersuchte das hydraulische Verhalten von durchströmten Ionenaustauscherharzschichten bei Aufgabe von Schwingungen auf das Fluid. Insbesondere wurde die Resonanzfrequenz theoretisch und experimentell bestimmt. Für die Bestimmung der Resonanzfrequenz f_k in einem

Rohr - in - Rohr - System mit durchströmter Ionenaustauscherharzschicht wurde die Gleichung nach [79] abgeleitet:

$$f_R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g}{h_W} + \frac{P_i - \rho_L g h}{\rho_L h_W h_G}} \quad (3.2)$$

Die Schwingungserregung der Flüssigkeitssäule erfolgte durch eine Kolbenpumpe im Bereich von ca. 0,3 bis 4 Hz.

Die experimentellen Untersuchungen zur Stoffübertragung wurden mit Nickelnitratlösung Wofatit Ca 20 der Chemie AG Bitterfeld durchgeführt.

Es wurde durch den Einfluss von Schwingungen eine Erhöhung der nutzbaren Kapazität des Ionenaustauschers bis etwa 78 % erreicht.

Ebenfalls Usui [80] beschäftigte sich mit pulsierenden Flüssigkeiten in einem Festbett. In dieser Studie werden Effekte des Stofftransportes an Eisenteilchen dargelegt, welche bei metallischen Überzügen, z.B. Kupfer, Nickel, Chrom, von Bedeutung für die Industrie sind. Packungsmaterialien waren kugelförmige und kubische Eisenteilchen mit sehr unterschiedlichen Größen. Die Schwingung wurde mit einem Kolben aufgegeben, wobei verschiedene Geschwindigkeiten realisiert wurden.

Es konnte festgestellt werden, dass der Stoffübergangskoeffizient bei kubischen Teilchen besser war als bei kugelförmigen. Das kann darauf zurückgeführt werden, dass kubische Teilchen eine größere Oberfläche und damit eine größere Phasengrenzfläche aufweisen.

Iskakow [81] berichtete, dass die Intensivierung des Stofftransportprozesses im allgemeinen durch ein turbulentes Regime zustande kommt.

Das Problem des Stoffaustausches zwischen einer turbulenten flüssigen Phase und einer festen Phase sowie die Frage der Korrelation von Stoffübergangskoeffizient und pulsierender Flüssigkeit wurde auf der Basis von Spektralanalysen diskutiert. Es wurde gezeigt, dass die Schwingungen der Flüssigkeit keinen Einfluss auf die Reynold-Zahl, aber die Frequenz der Schwingungen einen starken Einfluss auf die Schmidt-Zahl hat.

Zusammenfassend lässt sich zum Einfluss von Schwingungen auf Stoffaustauschprozesse aus der Fachliteratur resümieren:

- durch das Aufbringen von Schwingungen auf Stoffaustauschprozesse kann sowohl der Stoffaustausch intensiviert werden.
- wenn diese Schwingungen im Bereich der Resonanzfrequenz erfolgt, kann mit erheblichen Energieeinsparungen gerechnet werden.

Die Literaturschau macht aber auch deutlich, dass für Stoffaustauschprozesse im Zusammenhang mit extern aufgebrachter Schwingungen eine Reihe von fachlichen Problemen zu klären ist, die eine industrielle Anwendung dieser Prozesse wirtschaftlich vertretbar machen. Dazu gehören z.B. Fragen nach dem Verhalten des Stoffübergangskoeffizienten in Abhängigkeit von der Gasleerrohrgeschwindigkeit, vom Gasanteil in der Flüssigkeit, von den geometrischen Abmessungen der eingesetzten Schwingungsapparate oder auch von der Positionierung des Schwingers am verwendeten Apparat.

In der vorliegenden Arbeit wird der Versuch unternommen, einige dieser Fragen zu klären, wobei aus Gründen einer günstigen industriellen Nutzung mit möglichst niedrigen Resonanzschwingungen gearbeitet werden soll.

3.2 Berechnung der Resonanzfrequenz

Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit ist eine in Resonanzschwingungen versetzte Blasensäule. Das Gemisch besteht aus Wasser und Luft. In diesem Abschnitt sollen kurz die theoretischen Grundlagen dargelegt werden, wie ein solcher Zustand realisiert werden konnte und welche wichtigen Effekte sich durch die Schwingungen ergeben. Die Resonanzfrequenz einer Wassersäule lässt sich mit Beziehungen, die aus der Akustik stammen, herleiten. Für eine Blasensäule nach [76] gilt:

$$f_R = \frac{(2k-1)a}{4 \cdot h_W} \quad (3.3)$$

$k = 1, 2, 3, \dots$ Nummer der entsprechenden Grund- oder Oberschwingungen

Für eine einen Meter hohe reine Wassersäule würde sich, für die Grundschiwingung unter Normalbedingungen, eine Resonanzfrequenz von $f_R = 375$ Hz mit $a = 1500$ m/s und $k=1$ ergeben. Technisch ist dies nur mit Mühe umzusetzen.

Handelt es sich dagegen um ein Flüssigkeit - Gas - Gemisch, so ändert sich diese Frequenz radikal. Der Hauptgrund dafür, ist die stark veränderte Schallgeschwindigkeit. Für polytrope Zustandsänderungen ergibt sich die Schallgeschwindigkeit nach [76] wie folgt:

$$a = \sqrt{\frac{n \cdot p}{(\rho_W(1 - \varphi_G) + \rho_G \cdot \varphi_G) \cdot \varphi_G}} \quad (3.4)$$

Zur Abhängigkeit von der Art der Zustandsänderung (z. B. isotherm und adiabat)

Ist der entsprechende Polytropenexponent zu verwenden.

Eine exakte Bestimmung des Exponenten wurde aber nicht vorgenommen. Für die vorliegende Arbeit ist auch nicht mehr als ein Näherungswert notwendig.

Wird die Gemischschallgeschwindigkeit in Gleichung (3.3) eingesetzt, so ergibt sich die Resonanzfrequenz einer Blasensäule.

Den Verlauf der Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Gasgehalt zeigt Abb.3.1 die resultierende Resonanzfrequenz sinkt somit auf wenige Hertz. Eine einfache technische Umsetzung wird möglich.

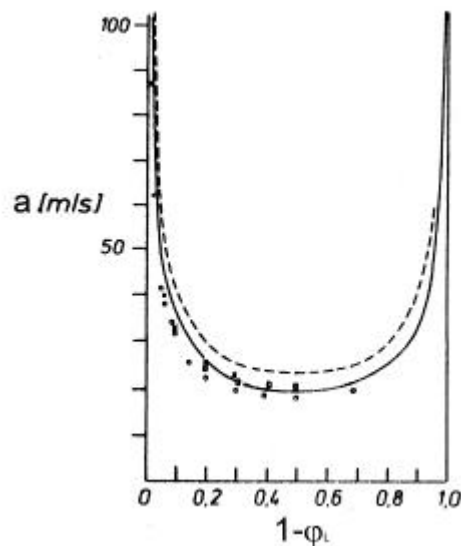


Abb.3.1 Schallgeschwindigkeit eines Gemisches von Wasser und Luft unter Normalbedingungen nach [86]

—— isotherm
 ----- isentrop

Nach Ostrovsky [76, 113] befindet sich bei der praktischen Anwendung der Schwingungen der günstigste Energieeintrag im Resonanzbereich. Dabei sollte die Schwingungsfrequenz, die durch eine äußere Kraft eingebracht wird, mit der Eigenschwingungsfrequenz des Zweiphasengemisches übereinstimmen.

Als grundlegende Basis der experimentellen Untersuchungen, wurden die spezifischen Eigenschwingungsfrequenzen des Zweiphasengemisches, im folgenden kurz benannt als Resonanzfrequenz, bei Veränderung der Phasenanteile für die Versuchsanlage ermittelt.

Somit ergeben sich folgende Berechnungen für Wasserhöhen von $h_W = 1,5$ m bis 4,5 m und integralen Gasgehalt von $\phi_G = \text{ca. } 0,05$ bis 0,2. Mit der Zusammensetzung des Zweiphasengemisches aus Wasser und Luft folgt unter den Angaben:

Umgebungsdruck $p = 10^5 \text{ Pa}$

$$h_{\text{Ges}} = h_w + h_G \quad (3.5)$$

beziehungsweise:

$$V_{\text{Ges}} = V_w + V_G \quad (3.6)$$

Mit den Volumina:

$$V_w = A \cdot h_w \quad (3.7)$$

und:

$$V_G = A \cdot h_G \quad (3.8)$$

Mit dem inneren Durchmesser der Blasensäule:

$$d = 0,08 \text{ m}$$

und

$$A = \frac{\pi}{4} d^2 \quad (3.9)$$

ergibt sich eine Grundfläche von: $A = 5,03 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$

Der integrale Gasgehalt φ_G im Gemisch ergibt sich aus:

$$\varphi_G = \frac{V_G}{V_{\text{Ges}}} \quad (3.10)$$

beziehungsweise:

$$\varphi_G = \frac{h_G}{h_{\text{Ges}}} = \frac{h_{\text{Ges}} - h_w}{h_{\text{Ges}}} \quad (3.11)$$

Der Volumenanteil der Flüssigkeit lässt sich mit folgender Gleichung berechnen:

$$\varphi_W = \frac{h_W}{h_{\text{Ges}}} = \frac{h_{\text{Ges}} - h_G}{h_{\text{Ges}}} \quad (3.12)$$

Für die Schallgeschwindigkeit im Gemisch gilt Gleichung (3.4).

Wegen $\rho_W \gg \rho_G$ lässt sich die Gleichung (3.4) vereinfachen zu:

$$a = \sqrt{n \frac{P}{\rho_W \varphi_G (1 - \varphi_G)}} \quad (3.13)$$

Daraus folgt für den isentropen Zustand mit $n = 1,4$

$$a_k = \sqrt{1,4 \frac{P}{\rho_W \varphi_G (1 - \varphi_G)}} \quad (3.14)$$

und für den isothermen Fall mit $n = 1$:

$$a_t = \sqrt{\frac{P}{\rho_W \varphi_G (1 - \varphi_G)}} \quad (3.15)$$

Die Resonanzfrequenz des Wasser - Luft - Gemisches ergibt sich nach [76] entsprechend Gleichung (3.3)

für den isentropen Zustand:

$$f_{Rk} = k \frac{a_k}{4 h_{\text{Ges}}} \quad (3.16)$$

und für den isothermen Fall aus:

$$f_{RT} = k \frac{a_t}{4 h_{Ges}} \quad (3.17)$$

Nach der Berechnung der Eigenschwingungsfrequenz des Zweiphasengemisches, muss diese als Umformerfrequenz für den Erreger beziehungsweise für die Hubkolbenpumpe in folgender Weise berechnet werden:

$$f_E = 15 \cdot f_{RK} \quad \text{beziehungsweise} \quad f_E = 15 \cdot f_{RT}$$

Aus den dargelegten Berechnungen folgende Ergebnisse sind in Tabelle 1 und 2 zusammengefasst, und die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen sind in Tabellen 3 und 4 dargestellt (s. Anhang CD Beilage).