

EINFLUSS EINER GAS-FLÜSSIG-GRENZFLÄCHE AUF DIE WASCHKINETIK PORÖSER STOFFE BEI MISCHBARKEIT VON BELADUNGS- UND WASCHFLÜSSIGKEIT

H. Beißner, E. Tsotsas

*Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik,
Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, Deutschland*

Schlüsselwörter: Poröser Stoff; Waschen; Kinetik; Verdrängung; Grenzflächenkonvektion; Teebeutel-effekt

Zusammenfassung: Die Waschkinetik poröser Stoffe wurde experimentell und theoretisch für den Fall der Mischbarkeit von Beladungs- und Waschflüssigkeit untersucht. Die Waschversuche wurden mit geeigneten Modellstoffen (Sinterbronzeyylinder, Isopropanol und Wasser) durchgeführt. Zur theoretischen Beschreibung der Waschkinetik wurden Modelle für die Konvektion aufgrund von Dichtegradienten und für die Diffusion im Körperinneren formuliert. Es wurde außerdem gezeigt, dass der Waschprozess unter bestimmten Umständen durch eine zusätzliche Gas-Flüssig-Grenzfläche erheblich beschleunigt werden kann. Dieser auf Grenzflächeninstabilitäten zurückzuführende und in der Literatur erstmalig beschriebene „Teebeutel-effekt“ wurde durch Experimente analysiert. Seine Auswirkung kann beim heutigen Stand des Wissens noch nicht vorausberechnet werden.

Formelzeichen

C – dimensionslose Porositätsfunktion;
 d_p – mittlerer Partikeldurchmesser, m;
 d_{Pore} – mittlerer Porendurchmesser, m;
 D – Diffusionskoeffizient, m^2/s ;
 f – Eintauchfrequenz, $1/\text{s}$;
 g – Erdbeschleunigung, m/s^2 ;
 m – Masse der Beladungsflüssigkeit, kg;
 t – Zeit, s;
 z – Längenkoordinate, m;
 z_L – Probekörperlänge, m.

Dimensionslose Kennzahlen

Ar – Archimedeszahl;
 Fo – Fourierzahl;

β – Stoffübergangskoeffizient, m/s ;
 ζ – dimensionslose Lage der Verdrängungsfront;
 ν – kinematische Viskosität, m^2/s ;
 ρ – Flüssigkeitsdichte, kg/m^3 ;
 σ – Oberflächenspannung, N/m ;
 ψ – Porosität.

Indizes

0 – Anfang;
 1 – Waschflüssigkeit;
 2 – Beladungsflüssigkeit;
 eff – effektiv;
 kurz – Kurzzeitlösung;
 lang – Langzeitlösung.

1 Einleitung

Die waschende Dekontamination poröser Feststoffe und damit die Entfernung einer unerwünschten Flüssigkeit aus dem Inneren eines porösen Feststoffs durch eine Waschflüssigkeit ist ein wichtiger und weit verbreiteter Prozess in der stoffumwandelnden Industrie sowie in der Umwelt- und Aufbereitungstechnik. Beispiele für solche Waschprozesse sind die Entfernung von brennbaren oder toxischen Lösungsmitteln aus Trocknungsgut, die Reinigung von Polymerisationsprodukten oder die Dekontamination von lösungsmittelkontaminierten Böden und Baustoffen.

Für die Auswahl, Dimensionierung und Optimierung von Waschverfahren sind Erkenntnisse über die jeweilige Waschkinetik von zentraler Bedeutung. Diese ist allerdings für poröse Feststoffe nach dem Stand des Wissens weder exakt vorausberechenbar noch aus wissenschaftlichen Publikationen hinreichend bekannt. Entsprechende Veröffentlichungen beschränken sich überwiegend auf den Bereich der Bodensanierung und sind deshalb auf poröse Feststoffe nur sehr eingeschränkt übertragbar. Vor diesem Hintergrund war es das Ziel der vorliegenden Arbeit, das Waschen poröser Feststoffe unter leicht reproduzierbaren Bedingungen und mit sinnvollen Modellstoffen experimentell zu untersuchen, phänomenologisch zu erfassen und theoretisch zu beschreiben und dadurch grundlegende Daten und Erkenntnisse zur Waschkinetik zu gewinnen. Die hier präsentierten Ergebnisse beschränken sich auf Versuche mit porösen Einzelkörpern bei vollständiger Mischbarkeit von Beladungs- und Waschflüssigkeit. Dabei wurde insbesondere der Einfluss einer zusätzlichen Gas-Flüssig-Grenzfläche auf die Waschkinetik untersucht. Versuche mit Partikelkollektiven und nichtmischbaren Flüssigkeitskombinationen wurden ebenfalls durchgeführt und sollen separat mitgeteilt werden.

2 Versuchsprogramm

Als poröse Feststoffe wurden Zylinder aus Sinterbronze (Durchmesser sowie Länge: 30 mm) mit unterschiedlichen mittleren Porenweiten verwendet, die aufgrund ihrer Herstellungsweise (Sinterung von kugelförmigen Bronzepartikeln einer Größenklasse) eine relativ homogene Porenstruktur besitzen und sich dadurch als Modellstoffe für Stofftransportuntersuchungen sehr gut eignen. Die Porosität der Bronzeyylinder, ψ , wurde aus den jeweiligen Massen des unbeladenen und beladenen Probekörpers bestimmt. Die mittlere Porenweite der Bronzeyylinder, d_{pore} , wurde experimentell aus Druckverlustmessungen bestimmt, bei denen der poröse Probekörper mit Druckluft durchströmt wurde. Dies ist unter dem Aspekt wichtig, dass diese Größe somit feststeht und bei der Modellierung nicht, wie in der Literatur häufig, zur Anpassung herangezogen wurde.

Als Wasch- bzw. Beladungsflüssigkeit wurden Wasser und Isopropanol verwendet. Die Kombination Wasser und Isopropanol wird häufig als Modellsystem für Stofftransportuntersuchungen eingesetzt. Beide Flüssigkeiten sind vollständig ineinander mischbar und besitzen neben unterschiedlicher Dichte und Viskosität auch eine deutlich unterschiedliche Oberflächenspannung ($\sigma_{\text{H}_2\text{O}}$: 72,1 mN/m,

σ_{Iso} : 20,9 mN/m, jeweils bei 25 °C). Sie sind deshalb für Untersuchungen zum Einfluss einer zusätzlichen Gas-Flüssig-Grenzfläche auf die Waschkinetik besonders geeignet.

Alle Waschversuche wurden in einem doppelwandigen Rührkessel (Nennvolumen: 500 ml) durchgeführt, in dem die Waschflüssigkeit auf eine konstante Temperatur von 25 °C thermostatisiert und durch Rühren mit einem Zweiblattrührer homogenisiert wurde. Die Waschflüssigkeitsmenge wurde so gewählt, dass ihre zeitliche Zusammensetzungsänderung während des Waschens sehr klein war, aber dennoch mit großer Genauigkeit über eine flüssigseitige Analyse bestimmt werden konnte. Einen Überblick über die Versuchsanlage gibt Abb. 1.

Jeder Waschversuch begann durch das Platzieren des unter Vakuum beladenen Probekörpers in die Waschflüssigkeit. Während des Waschens wurde die Dichte der Waschflüssigkeit kontinuierlich im geschlossenen Kreislauf mit einem Biegeschwinger (Paar Physica DMA 58) gemessen. Dabei wurden trotz Thermostatisierung geringe Schwankungen der Waschflüssigkeitstemperatur beobachtet, die durch eine Korrekturfunktion kompensiert wurden. Aus den gemessenen und korrigierten Dichtedifferenzen wurde die noch im Probekörper verbliebene Beladungsflüssigkeitsmasse, m , berechnet und bezogen auf die Anfangsmasse an Beladungsflüssigkeit, m_0 , in Abhängigkeit von der Versuchszeit als sogenannte Waschverlaufskurve aufgetragen, die charakteristisch für die Waschkinetik ist.

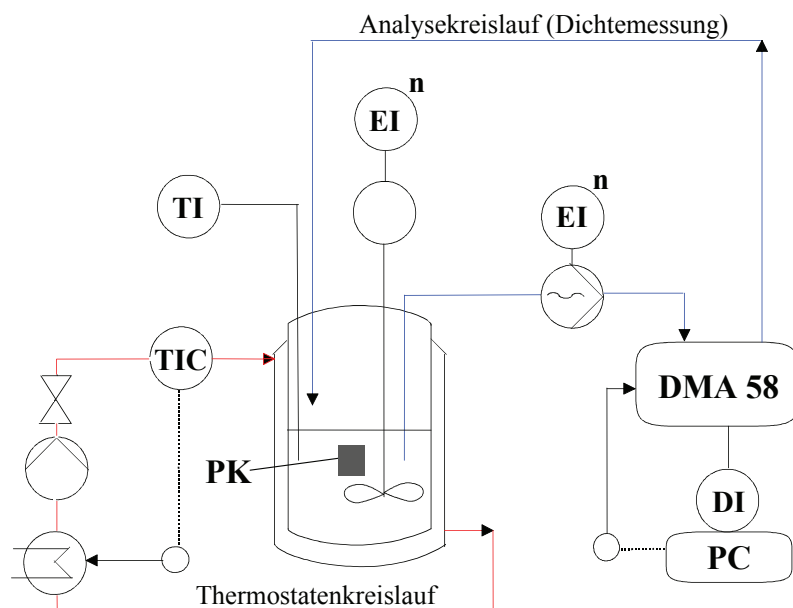


Abb. 1 Versuchsanlage zur experimentellen Bestimmung der Waschkinetik mit temperierbarem Rührkessel und Online-Dichteanalytik; (PK: Probekörper)

In einer ersten Gruppe von Versuchsreihen blieb der Probekörper stets vollständig in der durch einen Rührer homogenisierten Waschflüssigkeit eingetaucht. Dabei wurden Versuche mit Bronzestylindern mit 5 unterschiedlichen mittleren Porenweiten durchgeführt. Als weitere Parameter wurden die Länge, die Position (stehend, liegend) und die Stoffaustauschfläche der Bronzestylinder (Versiegelung von Stirn- oder Mantelfläche) sowie die Stoffaustauschrichtung (Umtauschen von Beladungs- und Waschflüssigkeit) variiert, um den Einfluss der Dichtekonvektion auf die Waschkinetik genauer herauszuarbeiten. Über die Ergebnisse dieser Versuche wurde bereits berichtet [1 – 4], so dass sie hier nur auszugsweise und in stark verkürzter Form dargestellt werden.

In einer zweiten Gruppe von Versuchsreihen wurde schließlich der Einfluss einer zusätzlichen Gas-Flüssig-Grenzfläche und damit eventuell verbundener Grenzflächeninstabilitäten auf die Waschkinetik untersucht. Dazu wurden als Parameter zunächst die mittlere Porengröße der Bronzestylinder, die Stoffaustauschfläche (Versiegelung der Mantelfläche) sowie die Eintauchfrequenz variiert. Dabei wurden die Bronzestylinder so in die Flüssigkeit eingetaucht, dass sie am höchsten Punkt ca. 5 mm über der Wasseroberfläche hingen und am tiefsten Punkt mit mindestens 5 mm Waschflüssigkeit bedeckt waren, was einer Eintauchamplitude von 4 cm entsprach. In weiteren Versuchen wurden die Bronzestylinder innerhalb der Waschflüssigkeit periodisch auf und ab bewegt, ohne die Flüssigkeitsoberfläche zu durchqueren, um zu überprüfen, ob eine eventuelle Beschleunigung des Waschens wirklich mit der zusätzlichen Gas-Flüssig-Grenzfläche beim Eintauchen zusammenhängt oder nur auf die mechanische Bewegung des Probekörpers zurückzuführen ist. Ergänzend dazu wurden Versuche mit umgekehrter Stoffaustauschrichtung (Umtauschen von Beladungs- und Waschflüssigkeit) sowie mit variabler Eintauchamplitude (30, 40, 50 mm) und variabler Eintauchperiodizität (gepulstes Eintauchen und Herausziehen) durchgeführt.

3 Modellierung

Bei Waschprozessen mit vollständiger Mischbarkeit von Beladungs- und Waschflüssigkeit sind Konvektion sowie Diffusion die maßgeblichen kinetischen Mechanismen. Als Basis für die theoretische Betrachtung diene deshalb eine unter Annahme von flüssigseitiger Konvektion aufgrund von Dichtegradienten („Verdrängungsmodell“) und molekularer Diffusion im freien Porenraum des porösen Feststoffs („Diffusionsmodell“) vorausberechenbare Waschkinetik. Das Verdrängungsmodell beschreibt die Verdrängung einer Beladungsflüssigkeit aus dem Inneren eines porösen Körpers durch eine Waschflüssigkeit unter folgenden Voraussetzungen:

- Eindimensionale Verdrängung durch Dichtekonvektion in vertikaler Richtung;
- Scharfe Verdrängungsfront, keine axiale Dispersion;
- Strömungsdruckverlust nach d'Arcy [5, 6];
- Vernachlässigung der Trägheitskräfte;
- Vernachlässigung des Stoffaustauschs durch die Zylindermantelfläche;
- Konstante Waschflüssigkeitsdichte;
- Vollständige Mischbarkeit von Beladungs- und Waschflüssigkeit.

Diese Annahmen implizieren die Betrachtung des Probekörpers als ein Bündel gleich großer paralleler Kapillaren. In diesem Fall kann die Waschkinetik aus einem Gleichgewicht zwischen der Auftriebs- und Gewichtskraft der Beladungsflüssigkeit und den Reibungskräften beider Flüssigkeiten berechnet werden. Man erhält die dimensionslose Gleichung

$$Fo = \frac{Cz^*}{Ar} \int_0^{\zeta} \frac{1 + (\rho^* v^* - 1)\zeta}{1 - \zeta} d\zeta, \quad (1)$$

in der die Fourierzahl

$$Fo = \frac{tv_1}{d_p^2} \quad (2)$$

als dimensionslose Verdrängungszeit abhängig ist von der Archimedeszahl

$$Ar = \frac{(\rho_2 - \rho_1)gd_p^3}{\rho_1 v_1^2}, \quad (3)$$

einer Porositätsfunktion

$$C = 150 \frac{(1 - \psi)^2}{\psi^2}, \quad (4)$$

dem Längenverhältnis

$$z^* = \frac{zL}{d_p} \quad (5)$$

und den Stoffwerteverhältnissen zwischen Wasch- und Beladungsflüssigkeit

$$\rho^* = \frac{\rho_2}{\rho_1}, \quad (6)$$

$$v^* = \frac{v_2}{v_1}. \quad (7)$$

Mit

$$\zeta = \frac{z}{z_L} \quad (8)$$

wird die dimensionslose Lage der Verdrängungsfront bezeichnet. Zwischen dem mittleren Durchmesser der Einzelpartikeln, d_p , aus denen der poröse Probekörper gesintert wurde, und der mittleren Porenweite des porösen Körpers, d_{pore} , gilt näherungsweise:

$$d_{\text{pore}} = \frac{2}{3} \frac{\psi}{(1-\psi)} d_p . \quad (9)$$

Betrachtet man den Waschvorgang hingegen als vollständig von der Diffusion im Inneren des porösen Körpers kontrolliert, so kann er mit einem Diffusionsmodell beschrieben werden. Für z.B. einen zylindrischen Probekörper mit versiegelter Mantelfläche kann in guter Näherung ein für Diffusion charakteristischer Stoffübergangskoeffizient β aus der Kurz- und Langzeitlösung für den instationären Stofftransport in einer unendlich langen Platte berechnet werden [7, 8]:

$$\beta_{\text{kurz}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{D_{\text{eff}}}}{\sqrt{t}} , \quad (10)$$

$$\beta_{\text{lang}} = \frac{D_{\text{eff}}}{z_L} \frac{\pi^2}{2} , \quad (11)$$

$$\beta = \sqrt{\beta_{\text{kurz}}^2 + \beta_{\text{lang}}^2} . \quad (12)$$

Dabei muss ein effektiver binärer Diffusionskoeffizient berücksichtigt werden, der einen Versperrungsfaktor durch die poröse Feststoffmatrix enthält [9]:

$$D_{\text{eff}} = \bar{D}_{12} (1 - \sqrt{1 - \psi}) . \quad (13)$$

Neben dem kompletten Waschverlauf läßt sich auf dieser Basis durch Gleichsetzen von Kurz- und Langzeitlösung auch eine charakteristische Diffusionszeit einfach berechnen, die in dimensionsloser Schreibweise

$$F_0 = \frac{t D_{\text{eff}}}{z_L^2} = 0,05228 \quad (14)$$

lautet. Eine entsprechende Zeitkonstante für die Verdrängung ergibt sich aus Gl. (1) nach Festlegung der Integrationsgrenze. So führen die Gln (1) und (14) auch zu quantitativen Kriterien (Zeitkonstanten) zur Abschätzung des vorherrschenden kinetischen Mechanismus zwischen der von der Porengröße abhängigen Verdrängung und der von der Porengröße unabhängigen Diffusion.

4 Ergebnisse und Diskussion

In Abb. 2 sind die Waschverlaufskurven für 3 Bronzezylinder mit unterschiedlichen mittleren Porenweiten aufgetragen. Dabei dominiert bei den hier verwendeten Bronzezylindern mit ihren doch recht weiten Poren eindeutig die Verdrängung. Die Waschkinetik ist schnell und kann in ihren wesentlichen Zügen recht gut durch das Verdrängungsmodell beschrieben werden. Je kleiner jedoch die mittlere Porenweite der Bronzezylinder, desto langsamer wird der Verdrängungsmechanismus, bis schließlich (bei noch kleineren Porenweiten als den hier verwendeten) die Diffusion die kinetische Kontrolle übernehmen würde. Weiter erkennt man, dass eine Versiegelung der Zylindermantelfläche die Waschkinetik etwas, wenn auch nicht wesentlich, verlangsamt.

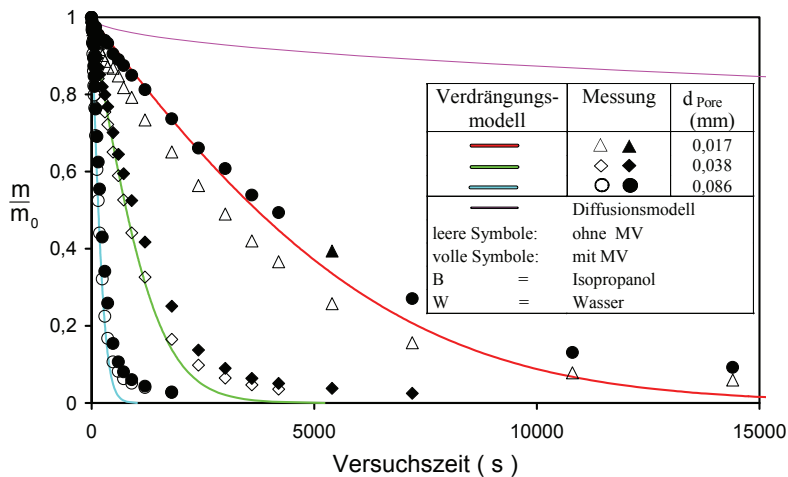


Abb. 2 Variation des mittleren Porendurchmessers mit und ohne Mantelversiegelung (MV)

Die weiteren durchgeführten Experimente zeigen, dass die Waschkinetik durch eine zusätzliche Gas-Flüssig-Grenzfläche deutlich beeinflusst werden kann. In Abb. 3 ist dieser von uns so genannte „Teebeutel effekt“ für einen Bronzestylinder mit kleiner Porenweite (0,038 mm) aufgetragen. Wie man hier sieht, kann der Waschverlauf durch periodisches Eintauchen des Probekörpers im Vergleich zum „normalen“ Waschverlauf erheblich beschleunigt werden. Dabei ist die Beschleunigung von der Eintauchfrequenz unabhängig. Wird jedoch der Probekörper mit einer Frequenz von 40/min ausschließlich innerhalb der Waschflüssigkeit auf-und-ab bewegt, ist keine Beschleunigung festzustellen. Entscheidend für die Beschleunigung bzw. Beeinflussung der Waschkinetik scheint also die zusätzliche Gas-Flüssig-Grenzfläche zu sein.

In Abb. 4 sind Versuche mit periodischem Eintauchen für einen Bronzestylinder mit größerer Porenweite aufgetragen. Hier führen größere Eintauchfrequenzen (20/min, 40/min) zu einer deutlichen Beschleunigung der Wäsche. Dagegen ist bei kleinen Eintauchfrequenzen (10/min) auch eine Verzögerung möglich. Bei einer noch größeren Porenweite konnte sogar nur bei einer Eintauchfrequenz von 40/min eine Beschleunigung des Waschens beobachtet werden, während das Waschen bei kleineren Eintauchfrequenzen verzögert wurde. Zur weiteren Untersuchung des Teebeutel effekts

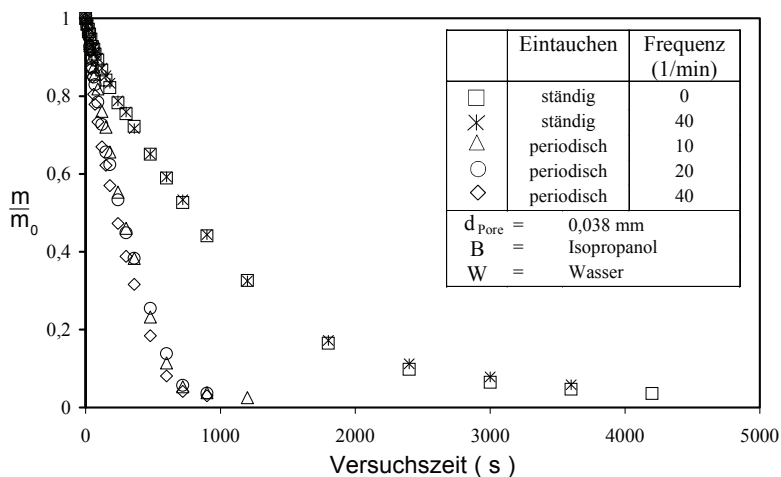


Abb. 3 „Teebeutelversuch“ – Variation der Eintauchfrequenz bei einer kleinen Porenweite

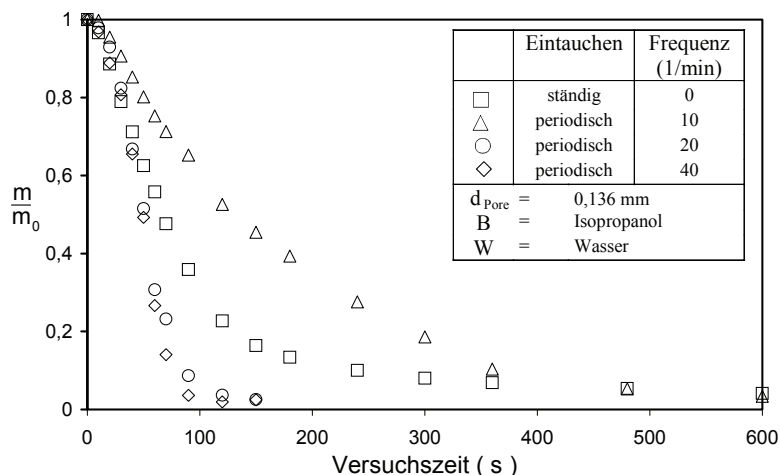


Abb. 4 „Teebeutelversuch“ – Variation der Eintauchfrequenz bei einer großen Porenweite

wurden auch Versuche mit Wasser als Beladungsflüssigkeit und Isopropanol als Waschflüssigkeit durchgeführt. Auch dabei – hier nicht dargestellt – wurden z.T. deutliche Beschleunigungen des Waschens durch periodisches Eintauchen beobachtet.

Es scheint also eine systematische Abhängigkeit der Waschkinetik von der Porenweite der Probekörper und der Eintauchfrequenz zu geben, die es galt, durch weitere Parametervariation näher zu untersuchen. Dabei beschränkten sich die weiteren Versuche auf Isopropanol als Beladungs- und Wasser als Waschflüssigkeit. Mit dem Ziel einer konsistenten Interpretation des Effekts wurden die entsprechenden Waschversuche („Teebeutelversuche“) mit jeweils einem Probekörper kleiner und großer Porenweite gezielt fortgeführt und systematisch erweitert. Als Versuchsparameter wurden neben der Eintauchfrequenz die Stoffaustauschfläche (durch Versiegelung der Zylindermantelfläche), die Eintauchamplitude (durch Variation des Eintauchhubs) sowie die Periodizität des Eintauchens bzw. Herausziehens variiert.

Eine Versiegelung der Zylindermantelfläche hat zur Folge, dass der Stoffaustausch nur noch über die Stirnflächen der Bronzeyylinder möglich ist. In Abb. 5 sind Waschverlaufskurven für mantelversiegelte Bronzeyylinder mit kleiner Porenweite bei Variation der Eintauchfrequenz aufgetragen. Wie man hier deutlich sieht, kann die Waschkinetik durch periodisches Eintauchen bei größeren Eintauchfrequenzen erheblich beschleunigt werden. Bei einer großen Porenweite und kleinen Eintauchfrequenzen ist allerdings auch eine Verzögerung möglich (Abb. 6).

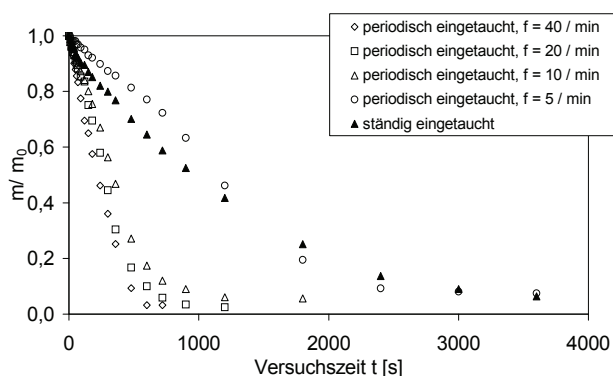


Abb. 5 Probekörper mit $d_{\text{Pore}} = 0,038 \text{ mm}$ und mit versiegelter Mantelfläche, Variation der Eintauchfrequenz

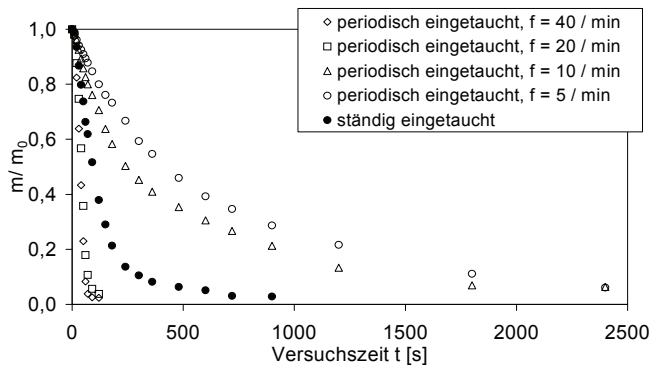


Abb. 6 Probekörper mit $d_{\text{pore}} = 0,136 \text{ mm}$ und versiegelter Mantelfläche, Variation der Eintauchfrequenz

Im Vergleich mit den entsprechenden Versuchen ohne Versiegelung sind die Waschverläufe bei großen Eintauchfrequenzen ($f = 40/\text{min}$ bzw. $20/\text{min}$, ohne Abbildung) nur marginal langsamer. Dies trifft auch bei kleiner Porenweite und $f = 10/\text{min}$ zu (Abb. 7). Lediglich bei der kleinen Porenweite und $f = 5/\text{min}$ (Abb. 7) wie auch bei der großen Porenweite und $f = 10/\text{min}$ bzw. $5/\text{min}$ (Abb. 8) ist die Waschkinetik der mantelversiegelten Körper deutlich langsamer als jene der Körper ohne Versiegelung.

Es ist somit deutlich, dass eine Versiegelung der Zylindermantelfläche ein beschleunigtes Auswaschen der Probekörper nur unter gewissen Umständen verhindern kann, meistens jedoch nur einen relativ geringen Einfluss hat. Dies bedeutet wiederum, dass der Stoffaustausch durch die Zylinderstirnflächen in vielen Fällen wesentlich zum Teebeutel-effekt beitragen muss.

In diesem Zusammenhang wurde in einer weiteren Versuchsreihe der Eintauchhub des Probekörpers (Höhendifferenz zwischen der minimalen und maximalen Position der Probekörpermitte) variiert. Als Ergebnis zeigte sich, dass die Waschkinetik bei einer Eintauchfrequenz von $f = 20/\text{min}$ nahezu unabhängig vom Eintauchhub beschleunigt wird, sofern der Probekörper bei seiner periodischen Bewegung vollständig in die Waschflüssigkeit eintaucht bzw. vollständig aus dieser herausgehoben wird. Dies war bei einer Eintauchamplitude von 4 und 5 cm der Fall. Taucht er jedoch in die Waschflüssigkeit ein bzw. wird er aus ihr herausgezogen, ohne mit der Stirnfläche die Gas-Flüssig-Grenzfläche zu durchstoßen (Hub: 3 cm), so entsprechen die Waschverläufe lediglich jenen mit ständigem Eintauchen (Abb. 9 und 10). Damit ist

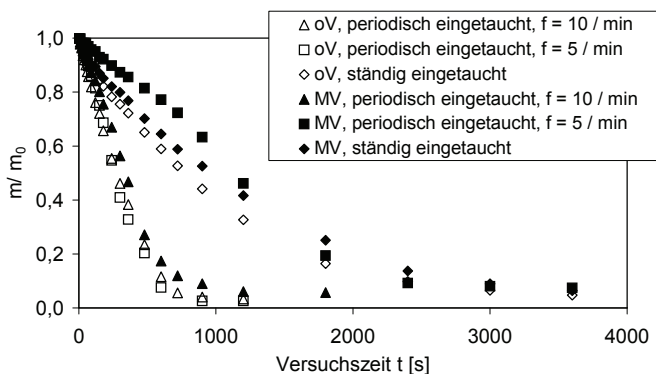


Abb. 7 Probekörper ($d_{\text{pore}} = 0,038 \text{ mm}$) mit (MV) und ohne (oV) Mantelflächenversiegelung, geringe Eintauchfrequenzen

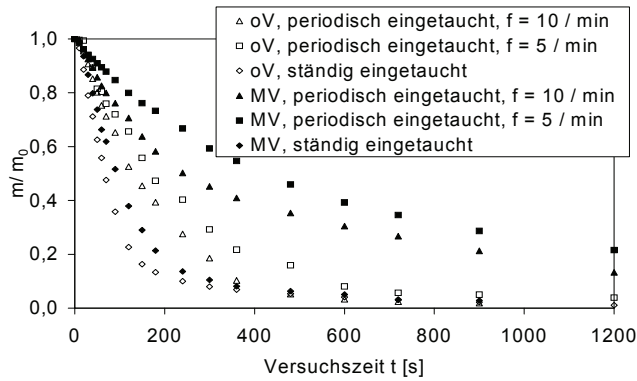


Abb. 8 Probekörper ($d_{\text{Pore}} = 0,136 \text{ mm}$) mit (MV) und ohne (oV) Mantelflächenversiegelung, geringe Eintauchfrequenzen

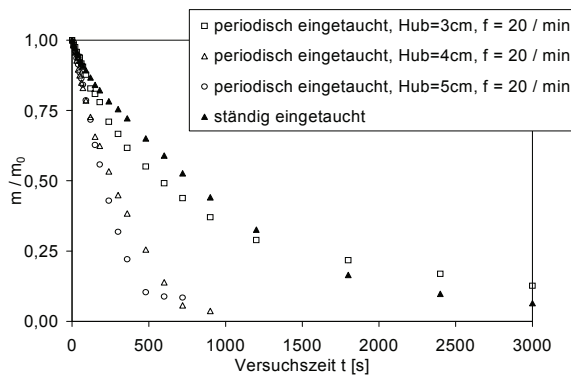


Abb. 9 Probekörper mit $d_{\text{Pore}} = 0,038 \text{ mm}$, Variation Eintauchhub, oV

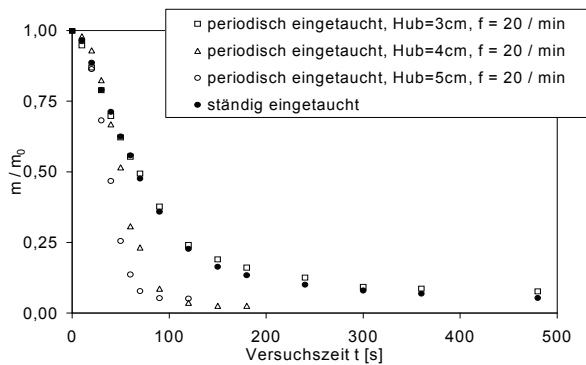


Abb. 10 Probekörper $d_{\text{Pore}} = 0,136 \text{ mm}$, Variation Eintauchhub, oV

eindeutig nachgewiesen, dass nicht die Auf- und Abwärtsbewegung des Probekörpers, sondern das vollständige Herausheben und Wiedereintauchen seiner Stirnflächen durch die Gas-Flüssig-Grenzfläche auf entscheidende Weise zum Teebeutel-effekt beiträgt. Es soll zum besseren Verständnis ergänzt werden, dass sich die Körpermitte im zeitlichen Mittel auf Höhe der Gas-Flüssig-Grenzfläche befindet, die somit der Mittelpunkt der Oszillation ist.

In weiteren Versuchen wurde untersucht, welchen Einfluss ein gepulstes, nichtperiodisches Eintauchen bzw. Herausziehen auf die Waschkinetik hat. Dabei entsprach die Eintauch- bzw. Herausziehphase einem Zyklus periodischer Versuche mit der Frequenz $f = 20/\text{min}$, eine unterschiedliche Anzahl weiterer Zyklen wurde jedoch ausgelassen. Abhängig von dieser Anzahl, also von der Eintauch- oder Herausziehhäufigkeit, veränderte sich die reale Waschzeit bzw. die Position der Körpermitte im zeitlichen Mittel im Verhältnis zur Gas-Flüssig-Grenzfläche. In den Abb. 11 und 12 sind die Ergebnisse für die genannten Probekörper kleiner bzw. großer Porenweite aufgetragen.

Es zeigte sich, dass Versuche mit gepulstem Eintauchen bei kleiner Porenweite deutlich schneller verlaufen als bei gepulstem Herausziehen oder periodischem Eintauchen, obwohl ihre reale Waschzeit wesentlich kürzer ist (Abb. 11). Bei einer großen Porenweite ist hingegen das periodische Eintauchen am schnellsten (Abb. 12).

Entscheidend scheint dabei das durch visuelle Beobachtungen bestätigte Mitziehen eines Waschflüssigkeitsfilms beim Herausziehen des Probekörpers zu sein. Dieser Film rieselt an der Seite des Körpers ab und bildet an seiner Stirnfläche einen i.d.R. relativ großen Tropfen. Das Mitreißen der Waschflüssigkeit und die Tropfenbildung werden von der Geschwindigkeit des Herausziehens beeinflusst und hängen auch eindeutig von der Porengröße ab, kleinere Poren waren bei den Experimenten hierfür günstiger. Während sich Probekörper und der genannte Waschflüssigkeitstropfen noch in der Luft befinden, reichert sich letzterer stark und beobachtbar mit Beladungsflüssigkeit an. Hierfür sind bei der untersuchten Kombination von Isopropanol als Beladungs- und Wasser als Waschflüssigkeit Marangoni-Effekte verantwortlich. Dabei strebt das Isopropanol (die Substanz mit der geringeren Oberflächenspannung) aus dem Körperinneren an die Gas-Flüssig-Grenzfläche, um die Gesamtenergie des Systems zu

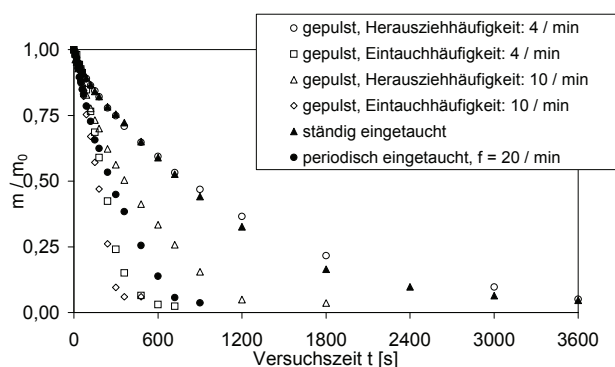


Abb. 11 Probekörper mit $d_{\text{Pore}} = 0,038 \text{ mm}$, gepulstes Eintauchen bzw. Herausziehen, σV

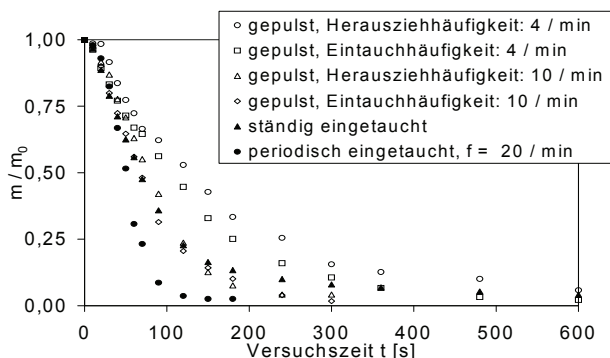


Abb. 12 Probekörper mit $d_{\text{Pore}} = 0,136 \text{ mm}$, gepulstes Eintauchen bzw. Herausziehen, σV

minimieren. Folge davon ist die sogenannte Marangoni-Grenzflächenkonvektion. Aber auch bei der umgekehrten Anordnung wären Dichteinstabilitäten auf ähnliche Weise wirksam. Die aus dem Körper entwichene Beladungsflüssigkeit wird beim Eintauchen in die Waschflüssigkeit, manchmal sogar durch Abtropfen, endgültig entfernt. Dass für den Marangoni-Effekt das Vorhandensein der Gas-Flüssig-Grenzfläche notwendig ist, erklärt den Vorteil, den die aperiodische, intermittierende Vorgehensweise des gepulsten Eintauschens haben kann. Insgesamt wird dadurch eine wesentliche Ursache des Teebeuteleffekts und damit des Einflusses einer zusätzlichen Gas-Flüssig-Grenzfläche auf die Waschkinetik poröser Feststoffe bei Mischbarkeit von Beladungs- und Waschflüssigkeit deutlich.

Zusammenfassend haben die Versuche mit Bewegung des beladenen Körpers durch die Flüssig-Gas-Phasengrenzfläche eine stets gut reproduzierbare Beeinflussung der Waschkinetik poröser Feststoffe zutage gebracht, die aus der Literatur nicht bekannt war und die wir „Teebeuteleffekt“ genannt haben. Viele Experimente dienen der systematischen Erfassung dieses neuartigen Effektes und haben die Wichtigkeit von Grenzflächeninstabilitäten und -konvektionen nachgewiesen. Besondere Bedeutung kommt dabei der Marangoni-Konvektion zu, die eine Anreicherung der Komponente mit der geringeren Oberflächenspannung an der Gas-Flüssig-Grenzfläche bewirkt. Dies kann jedoch auch durch mitgerissene Waschflüssigkeitsfilme geschehen, so dass es günstig sein kann, den Körper zwischen kurzen Tauchgängen für längere Zeit in der Luft zu halten. Die beobachteten Effekten können die Waschkinetik u.U. deutlich beschleunigen und damit die Waschzeit poröser Feststoffe in der betrieblichen Praxis erheblich verkürzen. Von einer modelmässigen Vorausberechnung der genannten Effekte sind wir jedoch noch weit entfernt.

Danksagung: die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Förderung dieser Arbeit

Literaturverzeichnis

1. Beißner, H., Tsotsas, E., Über das Waschen poröser Körper bei Mischbarkeit zwischen Beladungs- und Waschflüssigkeit, Poster auf dem GVC-Jahrestreffen, Karlsruhe, 2000 (s. auch Chem.-Ing.-Tech., 72 (2000), 1096).
2. Beißner, H., Tsotsas, E., Diffusion, Verdrängung und der Teebeutel-Effekt beim Waschen poröser Einzelkörper, Vortrag auf der GVC-Fachauschusssitzung „Wärme- und Stoffübertragung“, Bamberg, 2001.
3. Beißner, H., Tsotsas, E.: Miscible displacement and diffusion during the removal of undesired liquids from porous bodies by washing, Proceedings of the 3rd European Congress of Chemical Engineering, Nürnberg, 2001, Paper No. 436 (s. auch Chem.-Ing.-Tech. (73) 6/2001).
4. Beißner, H., Tsotsas, E.: Washing of porous bodies: Mechanisms, fundamentals and process intensification, Vortrag auf der Achema, Frankfurt/Main 2003.
5. Schlünder, E. U., Tsotsas, E., Wärmeübertragung in Festbetten, durchmischten Schüttgütern und Wirbelschichten, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1988.
6. Tsotsas, E., Über die Wärme- und Stoffübertragung in durchströmten Festbetten: Experimente, Modelle, Theorien, VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 3, Nr. 223, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1990.
7. Baehr, H. D., Stephan, K., Wärme- und Stoffübertragung, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1994.
8. Schlünder, E.-U., Martin, H., Einführung in die Wärmeübertragung, 8. Aufl., Vieweg Verlag, Braunschweig, 1995.
9. Tsotsas, E., Abschnitt Dee „Wärmeleitung in Schütttschichten“ im VDI-Wärmeatlas, 7. Aufl., VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994.

**Влияние поверхности раздела газ – жидкость
на кинетику промывки пористых тел
в случае смешиваемости заполняющей и промывной жидкости**

Х. Байснер, Е. Тсотсас

*Кафедра термической технологии,
университет Отто фон Гурике, Магдебург, Германия*

Ключевые слова и фразы: вытеснение; кинетика; поверхностная конвекция; пористый материал; промывка; эффект чайного пакетика.

Аннотация: Кинетика промывки пористых материалов была экспериментально и теоретически исследована для случая смешиваемости заполняющей и промывной жидкости. Опыты по промывке были проведены с выбранными модельными материалами (бронзовый спеченный цилиндр, изопропанол и вода). Для теоретического описания сформулированы модели конвекции на основе градиентов плотности и диффузии внутри тела. Кроме того показано, что процесс промывки при определенных обстоятельствах может быть значительно ускорен посредством дополнительной газожидкой поверхности раздела. Этот «эффект чайного пакетика», приводящий к нестабильности пограничной поверхности и впервые описанный в литературе, был проанализирован экспериментально. Его влияние при сегодняшнем уровне знаний заранее рассчитать теоретически не удастся.

**Influence of a Gas-Liquid Interface on Washing Kinetics
of Porous Bodies in Case of Miscibility Between Loading
and Washing Liquid**

H. Beißner, E. Tsotsas

Thermal Process Engineering, Otto-von-Guericke-University, Magdeburg, Germany

Key words and phrases: porous body; washing; kinetics; displacement; interface convection; tea-bag effect.

Abstract: The kinetics of washing of porous bodies has been investigated experimentally and theoretically for the case of miscibility between washing and loading liquid. The washing experiments have been carried out with appropriate model substances (sintered bronze cylinders, isopropanol, water). To describe the process, models for density-driven convection (displacement) and intraparticle diffusion have been used. Furthermore, it has been demonstrated that an additional gas-liquid interface can, in many cases accelerate considerably the kinetics of washing. This “tea-bag effect” is due to interface instabilities and has never before been described in literature. It has been analyzed systematically by measurements, but can not yet be predicted in a quantitative way.

Influence de l'interface gaz-liquide sur la cinétique du lavage des corps poreux en cas du mixage du liquide de chargement et de lavage

Résumé: La cinétique du lavage des matériaux poreux fut étudiée théoriquement et expérimentalement pour le cas du mixage du liquide de chargement et de lavage. Les essais du lavage furent exécutés avec les substances appropriées de modèle (cylindre de bronze aggloméré, isopropanol, eau). Pour la description théorique sont formulés les modèles de la convention. On démontra que le processus du lavage peut être accéléré par l'addition de l'interface gaz-liquide. C'est "l'effet du paquet de thé" qui est dû à l'interface instable et qui fut décrit dans la littérature expérimentalement, mais pas théoriquement.
