

10. Zusammenfassung

Die Regeneration eines Filtermaterials in der Tiefenfiltration stellt einen entscheidenden Prozeß zur Sicherung einer gleichbleibenden Filtratqualität dar. Bei einer unzureichenden Regeneration sind insbesondere Filtermaterialien mit starker Strukturierung der Oberflächen von einer Verminderung der Abscheideleistung betroffen. Für ein neuartiges Filtermaterial mit extremer Strukturierung der Oberfläche, den sogenannten permeablen synthetischen Kollektoren (PSK), liegen bisher keine grundlegenden Informationen zu ihrer Regeneration bzw. den während der Regeneration ablaufenden Mechanismen vor, die die Regeneration der permeablen Kollektoren sicherstellen können.

Um diese Wissenslücke zu schließen, wird in dieser Arbeit sehr grundlegend auf die Mechanismen eingegangen, die bei einer Umströmung von Filtermaterialien mit Wasser zur Ablösung der Beladung führen. Der größere Teil der Arbeit beschäftigt sich dabei mit grundlegenden Fragen zur Regeneration des neuartigen, hochporösen und permeablen Filtermaterials mit einem konventionellen Reinigungsschritt, der sogenannten Wasserspülung. Experimentelle Untersuchungen mit den PSK in einer dafür konzipierten Versuchsanlage konnten allein kein vollständiges Bild über die Mechanismen und die den Prozeß maßgeblich beeinflussenden verfahrenstechnischen Parameter liefern. Es war hierzu die Entwicklung eines Modells erforderlich, das aufbauend auf deterministischen Zusammenhängen die physikalischen Sachverhalte in ihren wesentlichen Eigenschaften wiedergibt. Die Komplexität der Vorgänge erlaubte es dabei nicht, auf einige vereinfachende Annahmen zu verzichten.

Um die wesentlichen Aspekte der Regeneration der PSK herauszuarbeiten, wurde zunächst von den Vorgängen bei herkömmlichen massiven Filtermaterialien ausgegangen. Anhand von bisherigen Arbeiten zur Partikelablösung wurde im Hinblick auf die Wasserspülung von Filtermaterialien gezeigt, daß die Ablösung von kugelförmigen Partikeln auf ebenen Oberflächen im wesentlichen unter dem Einfluß des Wandschergradienten der Strömung hervorgerufen wird. Zur Modellierung der Ablösung einer Beladung von der Oberfläche eines herkömmlichen Filtermaterials läßt sich dementsprechend ebenfalls der Wandschergradient verwenden. Der Wandschergradient ist von den jeweiligen Randbedingungen der Strömung abhängig und auf der Oberfläche des Filterkorns lokal stark unterschiedlich. Zu seiner Bestimmung wurde von etablierten Strömungsmodellen, sogenannten Zellenmodellen, ausgegangen, die in der Filtrationstechnik weit verbreitet sind und sich auch bei der Wasserspülung mit Fluidisierung des Filterbettes einsetzen lassen. Bereits existierende analytische Lösungen für die Umströmung von Kugeln in Zellenmodellen, die allerdings der Einschränkung schleichender Bedingungen unterliegen, wurden dazu verwendet, einen neuartigen Zusammenhang (Gl. 4.33) zwischen dem Schergradienten und den Prozeßgrößen abzuleiten. Dieser Zusammenhang beruht im Gegensatz zu einem bisher bekannten makroskopischen Ansatz auf einem deterministischen Modell, so daß hier eine exaktere

Beschreibung der Schergradienten für eine Ablösung von Partikeln auf einer Kugeloberfläche zu erwarten ist. Die Genauigkeit der Gleichung bei größeren Strömungsgeschwindigkeiten, die sich aus den Einschränkungen der Stokes'schen Näherung ergeben, wurde durch Lösung der vollständigen Navier-Stokes Gleichungen mit einem numerischen Verfahren geprüft. Dabei zeigte sich, daß die abgeleitete Gleichung (Gl. 4.33) bis zu Reynoldszahlen von 30 mit hinreichender Genauigkeit verwendet werden kann. Es läßt sich aus der Gleichung ableiten, daß die für die Ablösung maßgebliche Schubspannung an der Kollektoroberfläche proportional zum Kollektordurchmesser und der Dichtedifferenz zwischen Kollektor und Wasser ansteigt. Sie wird im weiteren von der Bettporosität des fluidisierten Bettes beeinflusst, jedoch ist sie weitgehend unabhängig von der Viskosität des Wassers.

Auf der Grundlage der Zellenmodelle wurden im weiteren die Strömungskräfte auf die Filtermaterialien sowie die dabei auftretenden Druckverluste bei der Durchströmung des Filterbettes berechnet. Im Vergleich zur empirischen Druckverlustkorrelation von Ergun war der modelltheoretisch bestimmte Verlauf der Druckverluste in Abhängigkeit der Reynoldszahl deutlich weniger gekrümmt. Es wird vermutet, daß es den sehr restriktiven Randbedingungen in den Zellenmodellen zuzuschreiben ist, daß trotz Verwendung der vollständigen Navier-Stokes Gleichungen sich eine gute Übereinstimmung mit der Druckverlust Korrelation von Ergun nur bis zu einer Reynoldszahl von 10 einstellte.

Die Regeneration der neuartigen PSK läßt sich in gleicher Weise wie bei den herkömmlichen massiven Kollektoren auf die Ablösung von Partikeln an ebenen Oberflächen zurückführen. Allerdings stellt sich die Strömungssituation bei den permeablen Kollektoren weitaus komplizierter dar als bei den massiven Kollektoren, was durch lokal stark unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten und die komplizierte Geometrie der inneren Oberfläche bei den permeablen Kollektoren bedingt ist.

Theoretische Betrachtungen zeigten, daß die Durchströmung des PSK sowohl von der Reynoldszahl der Anströmung als auch einer dimensionslosen Permeabilitätskennzahl für den Kollektor festgelegt wird. Nachdem die Permeabilitätskennzahl durch Druckverlustmessungen in einer Testzelle ermittelt wurde, konnte die Durchströmung des PSK für eine entsprechende Randbedingung berechnet werden. Es ist hierzu ein Strömungsmodell abgeleitet worden, das in einer Happelzelle die Umströmung des permeablen Kollektors auf der Grundlage der instationären Navier-Stokes Gleichungen beschreibt. Die Durchströmung des PSK wird in diesem Zusammenhang durch einen verallgemeinerten Brinkman-Ansatz modelliert. Zur Lösung der Strömungsgleichungen werden die Navier-Stokes Gleichungen und die Brinkman-Gleichung in eine Wirbeltransportformulierung überführt und mit finiten Differenzen höherer Ordnung diskretisiert. Das Strömungsmodell liefert als Ergebnis Informationen darüber, welche

Strömungsgeschwindigkeit sich an einem bestimmten Ort im PSK einstellt. Allerdings kann man mit den so ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten allein ohne zusätzliche Informationen zum Ablösungsprozeß noch keine Aussage zur ablösbaren Beladung treffen.

Deshalb sind zur Quantifizierung der durch die Strömung im permeablen Kollektor ablösbaren Beladung separate Versuche durchgeführt worden, aus denen eine empirische Gleichung zwischen der Strömungsgeschwindigkeit und der auf den inneren PSK-Oberflächen zurückbleibenden Beladung abgeleitet werden konnte. Daß eine solche Abhängigkeit zu erwarten ist, legen bisherige Arbeiten zu den Ablösemechanismen von Partikeln an ebenen Oberflächen nahe. Bei diesen Experimenten wurde das offenporige Schaumstoffmaterial, aus denen die PSK durch Ausstanzen hergestellt werden, in Form einer sogenannten Kollektormatte im Kanal einer Testzelle definiert eingespannt. Aufgrund dieser Strömungsführung konnte die gesamte Kollektormatte mit einem näherungsweise kolbenartigen Geschwindigkeitsprofil durchströmt und mit Modelltrübstoff beladen werden. Im Anschluß an die Beladungsphase wurde nach einer Spülung mit aufsteigenden Strömungsgeschwindigkeiten die jeweils auf der Kollektormatte zurückbleibende Beladung gemessen. Die experimentellen Ergebnisse belegen, daß die ablösbare Beladung sowohl von der Strömungsgeschwindigkeit als auch von der Anfangsbeladung abhängt. Mit einem empirischen Ansatz, der diese Abhängigkeiten berücksichtigt, ließen sich die Meßergebnisse zur Beladungsablösung in guter Näherung beschreiben. Während einer der Anpassungsparameter sich für die hier untersuchten Kollektormatten und dem hier eingesetzten Modellpartikeln als konstant erwies, legen die Versuchsergebnisse für den anderen Parameter eine Korrelation mit der auf die innere Oberfläche der Kollektoren bezogenen Anfangsbeladung nahe.

Aus den Ergebnissen der Untersuchungen mit den Kollektormatten mußte im weiteren die Schlußfolgerung gezogen werden, daß zur modelltheoretischen Bestimmung der ablösbaren Beladung im PSK die Annahme einer dann vorliegenden gleichförmigen Beladungsverteilung zu sehr ungenauen Ergebnissen führen mußte. Es wurde daher im weiteren eine Modellvorstellung zur Partikelabscheidung entwickelt, die die Berechnung der Beladungsverteilung innerhalb des permeablen Kollektors ermöglicht. Das Modell basiert einerseits auf dem abgeleiteten Strömungsmodell für PSK, andererseits auf dem gemeinhin akzeptierten Filtrationsgesetz von Iwasaki. Der zur Berechnung der Abscheidung noch erforderliche Filterparameter wurde experimentell in der Testzelle an durchströmten Kollektormatten in Abhängigkeit der Filtergeschwindigkeit bestimmt. Das Modell zur Partikelabscheidung in einem PSK erlaubt darüber hinaus auch die Berechnung der zu erwartenden Abscheideleistung einer Filterschicht aus permeablen Kollektoren. Aus einem Vergleich von berechneten mit experimentellen Abscheideleistungen, die an einem

Versuchsfiler ermittelt wurden, ließ sich eine Validierung des Filtrationsmodells inklusive des dabei eingesetzten Strömungsmodells durchführen.

An dem Versuchsfiler sind im weiteren experimentelle Untersuchungen darüber angestellt worden, welche Beladungen von den PSK abgelöst werden können. Es zeigte sich, daß durch eine Wasserspülung erheblich mehr Beladung abgelöst werden kann, wenn ein Übergang des Filterbettes in ein Wirbelbett durch eine entsprechende Fixierung verhindert wird. Weiterhin konnte überraschenderweise kein deutlicher Einfluß der Permeabilität der verwendeten PSK auf den ablösbaren Beladungsanteil nachgewiesen werden. Allerdings läßt sich aufgrund der experimentellen Befunde der ablösbare Beladungsanteil in einem geringen Maße durch die Größe des permeablen Kollektors beeinflussen. So wird bei dem kleineren Kollektor mit einem Durchmesser von 6 mm im Vergleich zum Kollektor mit 10 mm Durchmesser bei gleicher Spülgeschwindigkeit ca. 10% mehr Beladung abgelöst.

Die experimentellen Untersuchungen zur Beladungsablösung an Kollektormatten führten zu dem Ergebnis, daß die mit dem Strömungsmodell berechneten stationären Geschwindigkeiten innerhalb der PSK bei weitem zu klein sind, um die gemessenen Beladungsablösungen erklären zu können. Es wurde daraus gefolgert, daß die stationäre Strömungsgeschwindigkeit nur zu einem unerheblichen Anteil zur Ablösung der Beladung beiträgt. Der dominierende Einfluß mußte daher aus dem instationären Anfahrvorgang der Spülung resultieren. Entsprechende Modellrechnungen, die die instationären Vorgänge beim Starten der Spülung einbeziehen, zeigen innerhalb des permeablen Kollektors kurzfristig um ein Vielfaches höhere Strömungsgeschwindigkeiten im Vergleich zur stationären Lösung. Wird diese maximale Strömungsgeschwindigkeit mit den Ergebnissen an den Kollektormatten in Beziehung gesetzt, so resultieren daraus entsprechend weitaus höhere ablösbare Beladungen, die sich in sinnvollen Einklang mit den Meßergebnissen bringen lassen. Die Beschleunigung des Fluidstroms wurde in diesem Zusammenhang als Anpassungsgröße im Vergleich zu den vorliegenden Meßdaten eingesetzt.

Mit den Modellrechnungen zur ablösbaren Beladung eines PSK läßt sich insbesondere auch der experimentelle Befund bestätigen, daß mit abnehmender Spülwassertemperatur eine größere Beladung abgelöst werden kann. Dagegen führen die Modellrechnungen hinsichtlich der Kollektorgröße zu einer den experimentellen Befunden entgegengesetzten Tendenz. Die berechnete ablösbare Beladung steigt mit dem PSK-Durchmesser geringfügig, während die experimentellen Befunde eine Abnahme anzeigen. Dies läßt sich im wesentlichen durch die vernachlässigte Wiederanlagerung von bereits abgelösten Trübstoffpartikeln erklären, die mit zunehmender Kollektorgröße ansteigen wird.

Die Modellrechnungen zur ablösbaren Beladung wurden im weiteren dazu verwendet, zusätzliche Erkenntnisse von praktischer Bedeutung zu gewinnen. So ließ sich bspw. zeigen, daß mit steigender Beladung der PSK auch der ablösbare Beladungsanteil deutlich ansteigt. Bei großen Spülgeschwindigkeiten und hoher Beschleunigung des Spülwasserstroms kann durch eine Wasserspülung der weitaus größte Anteil der Beladung abgelöst werden. Vermutlich wird die auf den Fasern der PSK verbleibende Restbeladung mit zunehmenden Filtrationszyklen anwachsen und langfristig zu einer Störung der Filtration führen. Dem könnte dadurch begegnet werden, daß die sehr einfach durchzuführende Wasserspülung als Grundreinigungsverfahren eingesetzt wird und nach einer festzulegenden Anzahl von Filtrationszyklen eine Intensivreinigung durchgeführt wird. Letztere könnte z. B. in Form einer Ultraschallreinigung vorgenommen werden.

Einige Untersuchungen zur Regeneration permeabler Kollektoren mit Ultraschall als Intensivreinigung sind experimentell durchgeführt worden, um die wesentlichen Parameter für den Regenerationsvorgang darzustellen und quantifizieren zu können. Das Regenerationsverfahren sieht eine gleichzeitige Beschallung und Wasserspülung der beladenen Kollektoren vor. Die Wandler für die Ultraschallreinigung sind dazu unmittelbar in dem VersuchsfILTER, der für die Untersuchung der PSK hinsichtlich ihrer Abscheideleistung und Regenerierbarkeit verwendet wurde, integriert worden.

Als Ergebnis zeigte sich, daß es im wesentlichen von der eingetragenen Ultraschalleistung abhängt, welchen Reinigungsgrad der permeablen Kollektoren man erreichen kann. Hervorzuheben ist, daß im Gegensatz zur herkömmlichen Wasserspülung eine vollständige Reinigung aller in dieser Arbeit eingesetzten PSK-Typen mit der zur Verfügung stehenden Leistung von 1500W möglich war. Man kann die Ultraschallreinigung daher sicherlich als Intensivreinigungsverfahren bezeichnen. Die für eine vollständige Abreinigung aufzuwendende Ultraschalleistung ist umso geringer, je höher die Porosität der PSK ist und je kleiner die PSK sind. Der größere Einfluß kommt dabei der Größe des PSK zu. Hier ist festzuhalten, daß das Ultraschallreinigungsverfahren uneffektiv wird, wenn die PSK deutlich größer als 10mm im Durchmesser hergestellt werden. Vermutlich wird der Einfluß der Kollektorporosität und -größe auf den Regenerationsprozeß durch eine Dämpfung der Ultraschall-Signale an den inneren Oberflächen der PSK bewirkt. Dadurch wird dem System Ultraschalleistung zur Erzeugung von Kavitation entzogen, was sich in einer verminderten Reinigungswirkung speziell in den innersten Zonen der PSK äußert. Alternative Werkstoffe im Vergleich zum Polyurethan mit geringeren Dämpfungseigenschaften weisen daher wahrscheinlich deutlich bessere Regenerationseigenschaften durch Ultraschall auf und sollten bei der Gestaltung eines idealen permeablen Kollektors in Erwägung gezogen werden.

Verwendete Formelzeichen

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
a_k	Kugel-, Kollektorradius	m
a_p	Partikelradius eines Trübstoffteilchens	m
a_1	Kugelradius des Partikels 1	m
a_2	Kugelradius des Partikels 2	m
A_F	Filterquerschnittsfläche	m ²
Ar	Archimedeszahl	-
A_s	Porositätsfunktion nach Gl. 6.16	-
b	Radius der Happel-Zelle	m
c	Schallgeschwindigkeit (für Wasser bei 20°C: 1470 m/s)	m/s
c_A	Auftriebsbeiwert	-
c_{ab}	Ablaufkonzentration des Filters	kg/m ³
c_{Beh}	Konzentration im Rührbehälter	kg/m ³
$c_{k,m}$	mittlere Austrittskonzentration eines PSK	kg/m ³
c_W	Widerstandsbeiwert	-
c_0	Zulaufkonzentration	kg/m ³
c_{zu}	Zulaufkonzentration des Filters	kg/m ³
$c_{zu,0}$	Anfangszulaufkonzentration des Filters	kg/m ³
Δc	Konzentrationsänderung zwischen Zu- und Ablauf	kg/m ³
D	Filterdurchmesser	m
$D(x)$	elektrische Verschiebungsdichte	C/m ²
$D_{l,i}$	Diffusionskoeffizient der Ionenart i im Wasser	m ² /s
d_k	Kugel-, Kollektordurchmesser	m
d_p	Partikeldurchmesser eines Trübstoffteilchens	m
D_p	Diffusionskoeffizient eines Partikels im Fluid	m ² /s
d_R	Rohrdurchmesser	m

d_z	Durchmesser der zylindrischen PSK	m
e	Elementarladung ($1,60217733 \cdot 10^{-19} \text{C}$)	C
$E(x)$	elektrische Feldstärke	V/m
f	Frequenz des Ultraschallfeldes	Hz
F_A	Auftriebskraft	N
F_{Ad}	Adhäsionskraft eines Partikels	N
F_{ab}	Kraft zur Ablösung einer Partikels	N
$F_{h,x}$	Hydrodynamische Ablösekraft in x-Richtung	N
$F_{h,y}$	Hydrodynamische Ablösekraft in y-Richtung	N
F_w	Widerstandskraft	N
$F_{w,H}$	Widerstandskraft in einer Happelzelle	N
$F_{w,p}$	Druckwiderstand	N
$F_{w,p,H}$	Druckwiderstand in einer Happelzelle	N
$F_{w,R}$	Reibungswiderstand	N
$F_{w,R,H}$	Reibungswiderstand in einer Happelzelle	N
$F_{w,Stokes}$	Widerstandskraft nach Stokes	N
J	Partikelmassenstrom	kg/s
H_{123}	Hamakerkonstante	J
i	Laufvariable zur Diskretisierung der Radialkoordinate	-
I	mittlere Schallintensität im Ultraschallfeld	W/m ²
j	Laufvariable zur Diskretisierung der Winkelkoordinate θ	-
k	Wellenzahl	1/m
k	Permeabilität	m ²
k	Boltzmann-Konstante ($1,38066 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$)	J/k
k_i	Anpassungsparameter ($i=1, 2, 3, 4$)	
L	Bettlänge bzw. Länge einer Kollektormatte	m
m_{ab}	ablösbare Trübstoffmasse	kg

M_z	Hydrodynamisches Drehmoment	Nm
n	Exponent des Bettausdehnungsgesetzes	-
n_i	Anzahlkonzentration der Ionenart i	$1/m^3$
$n_{i,\infty}$	Anzahlkonzentration der Ionenart i in der freien Lösung	$1/m^3$
p	dimensionsloses Radienverhältnis	-
$p(r,\theta)$	Druck	N/m^2
p'	Druckdifferenz des Fluids (linearisiert um Ruhezustand)	N/m^2
p_0	Druck im Ruhezustand der Strömung (statischer Druck)	N/m^2
p_i	Druck an der Stelle i	N/m^2
$p_i(R)$	Innendruck in der Kavitationsblase	N/m^2
$p_{i0}(R_0)$	anfänglicher Innendruck der Kavitationsblase	N/m^2
$p_\infty(t)$	Druck im Ultraschallfeld	N/m^2
$p_w(\theta)$	Wanddruck auf der Kugeloberfläche	N/m^2
\hat{p}	Druckamplitude	N/m^2
Δp	Druckverlust	N/m^2
Pe	Peclet-Zahl $v_f \cdot d_k / D_p$	-
P_R	dissipierte Leistung	W
q	Parameter zur Einstellung der Gitterfeinheit	-
Q	Volumenstrom des Fluids	m^3/s
Q_H	in die Happelzelle eintretender Volumenstrom	m^3/s
Q_{perm}	durch den PSK permeierender Volumenstrom	m^3/s
$Q_0(x)$	Anzahlverteilung	-
$Q_3(x)$	Volumenverteilung	-
r	Radialkoordinate	m
r^*	dimensionslose Radialkoordinate r/a_k	-
R	dimensionsloser Radius der Happel-Zelle b/a_k	-
R	Radius der Kavitationsblase	m

\dot{R}	Radialgeschwindigkeit der Blasenwand	m/s
\ddot{R}	Radialbeschleunigung der Blasenwand	m/s ²
R_0	Anfangsradius der Kavitationsblase	m
Re	Reynoldszahl für den Kollektor $v_f \cdot d_k / \nu$	-
Re_s	Reynoldszahl bei der Sedimentation $v_s \cdot d_k / \nu$	-
Re_{mf}	Reynoldszahl im Lockerungspunkt $v_{mf} \cdot d_k / \nu$	-
Re_p	Reynoldszahl eines an einer Wand haftenden Partikels	-
s	Bogenlänge	m
t	Zeit	s
t^*	korrigierte Filterlaufzeit	s
t_0	mittlere Aufenthaltszeit im Zulaufsystem der Testzelle	s
T	absolute Temperatur	°K
T	Zeitkonstante	s
T_{sp}	Spüldauer	s
u	lokale Durchströmungsgeschwindigkeit des PSK	m/s
$u(x,y)$	Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung	m/s
$u(x,t)$	Schnelle einer Ultraschall-Welle	m/s
$\hat{u}(x,t)$	Schnelleamplitude einer Ultraschall-Welle	m/s
u_m	mittlere Anströmgeschwindigkeit	m/h
\vec{v}	Geschwindigkeitsvektor des Fluids	m/s
$v_{l,i}$	Wanderungsgeschwindigkeit der Ionenart i	m/s
v_r	Radialgeschwindigkeit des Fluids in Polarkoordinaten	m/s
v_θ	Tangentialgeschwindigkeit in Polarkoordinaten	m/s
v_f	Fluidgeschwindigkeit bei der Filtration oder Spülung	m/s
$v_{f,M}$	Spülgeschwindigkeit der Kollektormatte (Gl. 6.21)	m/h
$v_{f,M,0}$	Grenzspülgeschwindigkeit der Kollektormatte (Gl. 6.21)	m/h
v_s	Sedimentationsgeschwindigkeit der Kugel oder PSK	m/s

v_m	mittlere Rohrgeschwindigkeit	m/s
v_{mf}	Lockerungsgeschwindigkeit der Schüttung	m/s
V	Volumen eines PSK	m^3
V_B	Volumen des Filterbettes	m^3
V_B	potentielle Energie (Born' sche Kräfte)	J
V_{Beh}	Volumen des Rührbehälters	m^3
V_{DL}	potentielle Energie (Doppelschichtwechselwirkung)	J
V_K	Volumen des unkomprimierten Filtermaterials	m^3
V_M	Volumen einer Kollektormatte	m^3
V_Z	Porenvolumen einer Filterschüttung	m^3
W	Wechselwirkungsenergie (Hydratationskräfte)	J
w_R	spezifische dissipierte Leistung	W/m^3
x	Koordinatenrichtung	m
Δx	Länge eines Filterabschnittes	m
y	Koordinatenrichtung	
z	transformierte dimensionslose Radialkoordinate	-
z_i	Wertigkeit der Ionenart i	-

Griechische Symbole:

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
α	Verhältnis von Ablösekraft zu Adhäsionskraft	-
α	Komprimierfaktor für PSK	-
β	Öffnungswinkel des Strömungsfensters (Happel-Modell)	rad
β	Permeabilitätsparameter	-
γ	elementarer Abscheidegrad	-
γ^*	Kollektorabscheidegrad	-
$\gamma_{0,T}$	Transportwahrscheinlichkeit	-
$\gamma_{0,H}$	Haftwahrscheinlichkeit	-
θ	Tangentialkoordinate	rad
δ	Oberflächenabstand	m
δ_R	Höhe einer Wandrauhigkeit	m
ε	Bettporosität	-
ε_k	Korn-, Kollektorporosität	-
ε_0	elektrische Feldkonstante ($8,854187871 \cdot 10^{-12}$ As/(Vm))	As/(Vm)
ε_r	Dielektrizitätszahl ($\cong 81$ für Wasser)	-
φ	transformierte dimensionslose Wirbelstärke	-
$\psi(r,\theta)$	Stromfunktion	m ³ /s
$\psi^*(r,\theta)$	dimensionslose Stromfunktion	-
$\bar{\psi}(z,\theta)$	dimensionslose Stromfunktion	-
$\Psi(x)$	elektrisches Potential	V
$\Psi_i(x)$	elektrisches Oberflächenpotential der Oberfläche i	V
λ_0	Filterparameter	m ⁻¹
$\lambda_{0,M}$	Filterparameter einer PUR-Matte	m ⁻¹
ν	kinematische Viskosität	m ² /s

η	dynamische Viskosität	kg/(m·s)
μ_i	Ionenbeweglichkeit im elektrischen Feld der Ionenart i	m ² /(V·s)
ϕ	Wirbelstärke	s ⁻¹
ϕ^*	dimensionslose Wirbelstärke	-
ρ	Dichte des Fluids, z. B. Wasser	kg/m ³
ρ'	Dichtedifferenz des Fluids (linearisiert um Ruhezustand)	kg/m ³
ρ_0	Dichte des Fluids im Ruhezustand der Strömung	kg/m ³
$\rho_E(x)$	elektrische Raumladungsdichte	C/m ³
ρ_K	Kornrohddichte	kg/m ³
ρ_N	Kornnaßdichte	kg/m ³
ρ_S	Feststoffdichte eines Filterkorns	kg/m ³
$\Delta\rho$	Dichtedifferenz des Wassers und eines Partikels	kg/m ³
φ	Sphärizität	-
σ	Oberflächenspannung	N/m
σ	Kollisionsradius	m
σ	Beladung mit Trübstoffen	kg/m ³
σ_0	Anfangsbeladung eines Kollektors	kg/m ³
σ_0^*	flächenbezogene Anfangsbeladung eines Kollektors	kg/m ³
$\vec{\sigma}_w$	Spannungsvektor parallel zur Anströmachse	N/m ²
$\vec{\sigma}_A$	Spannungsvektor senkrecht zur Anströmachse	N/m ²
ξ	dimensionsloser Radius $r \cdot k^{-0,5}$	-
$\xi(x,t)$	Schallausschlag oder Elongation	m
$\hat{\xi}$	Auslenkungsamplitude einer Ultraschall-Welle	m
τ	dimensionslose Zeit	-
$\tau_{r\theta}$	tangentiale Schubspannung	N/m ²
τ_w	tangentiale Schubspannung an einer Oberfläche	N/m ²

κ_{DL}	Kehrwert der Debye-Hückel-Länge	m^{-1}
κ	Isentropenexponent	-
κ	Schergradient der Fluidströmung	s^{-1}
κ_w	Schergradient der Fluidströmung an einer Oberfläche	s^{-1}
$\kappa_{w,0}$	Schergradient bei einsetzender Ablösung von Beladung	s^{-1}
ω	Kreisfrequenz des Ultraschallfeldes	Hz
$\vec{\omega}$	Wirbelvektor	s^{-1}
$\Omega(\beta, \rho)$	Widerstandsfaktor	-

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

IR	Infrarot
NDIR	nondispersible infrared detector
PSK	permeabler synthetischer Kollektor
PUR	Polyurethan
TIC	total inorganic carbon
TOC	total organic carbon

Literatur

Addicks, R.: Beitrag zur Rückspülung von Filtern mit körnigen Materialien, Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1987

Amirtharajah, A.: Optimum Backwashing of Sand Filters, ASCE Journal of the Environmental Engineering Division 104 (1978), S. 917-932

Amirtharajah, A.: Fundamentals and theory of air scour, ASCE Journal of the Environmental Engineering Division 110 (1984), H. 3, S. 573-590

Amirtharajah, A.; Cleasby, J. L.: Predicting Expansion of Filters During Backwash, Journal AWWA 64 (1972), S. 52-59

Andersson, K. B.: Pressure Drop in Ideal Fluidization, Chem. Engng. Sci. 15 (1961), S. 276-297

Bell, G. M., Levine, S., McCartney, L. N.: Approximate methods of Determining the Double-Layer Free Energy of Interaction between two Charged Colloidal Spheres, J. Colloid Interface Sci 33 (1970), S. 335-359

Bergmann, L.: Der Ultraschall, S. Hirzel Verlag Stuttgart, 1954

Berlitz, B.; Kögler, H.: Brunnenregenerierung mit Ultraschall, bbr 48 (1997), S. 19-23

Bernhardt, H.; Gimbel, R.: Rückstandsarme Wasseraufbereitung, in: Neue Technologien in der Trinkwasserversorgung - DVGW Schriftenreihe Wasser Nr. 110, Hrsg: DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser 1995

Bollrich, G., Preißler, G.: Technische Hydromechanik, Verlag für Bauwesen, Berlin München 1992

Brinkman, H. C.: A Calculation of the Viscous Forces Exerted by a Flowing Fluid on a Dense Swarm of Particles, Appl. Sci. Res. A1, 1947, S. 27-34

Bronstein, I. N.; Semendjajew, K. A.; Musiol, G.; Mühlig, H.: Taschenbuch der Mathematik, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main 1995

Camp, T. R., Stein, P. C.: Velocity Gradients and Internal Work in Fluid Motion, J. of the Boston Society of Civil Engineers 30 (1943), S. 219-237

Cleasby, J. L.; Arboleda, J.; Burns, D.E.; Prendiville, P.W.; Savage, E.S.: Backwashing of Granular Filters, Journal AWWA 69 (1977), S. 115-126

Cleasby, J. L.; Fan, K.-S.: Predicting Fluidization and Expansion of Filter Media, Journal of the Environmental Engineering Division 107 (1981), S. 455-471

Cooksen, J. Th.: Removal of Submicron Particles in Packed Beds, Environm. Sci. + Technol. 4 (1970), S.128-134

Dandy, D. S., Dwyer, H. A.: A Sphere in Shear Flow at Finite Reynolds Number, Effekt of Shear on Particle Lift, Drag and Heat Transfer, Journal of Fluid Mechanics 216 (1990), S. 381-410

Dharmarajah, A. H.; Cleasby, J. L.: Predicting the Expansion Behaviour of Filter Media, Journal AWWA 78 (1986), S. 66-76

DIN 53420: Bestimmung der Rohdichte, Prüfung von Schaumstoffen, Januar 1958, Beuth-Verlag

DIN 66133: Bestimmung der Porenvolumenverteilung und der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Quecksilberintrusion, Juni 1993, Beuth-Verlag

DIN 66141: Darstellung von Korngrößenverteilungen, Februar 1974, Beuth-Verlag

DVGW-Arbeitsblatt W212: Filtration in der Wasseraufbereitung, Teil 3: Beurteilung und Anwendung von gekörnten Filtermaterialien, ZfGW-Verlag, Frankfurt, Entwurf vom Mai 1992

Ehrfeld, E.; Bott, R., Langeloh, Th.: Ultraschallreinigung von Filtermedien, Filtrieren und Separieren 8 (1994), S. 263-267

Ergun, S.: Mass-Transfer Rate in Packed Column, its Analogy to Pressure Loss, Chem. Engng. Progr. 48 (1952), S. 227-236

Fair, G. M., Geyer, J. C.: Water Supply and Wastewater Disposal, John Wiley & Sons, Inc., New York 1954

Fitzpatrick, C. S. B.: Improving Filter Backwashing Efficiency, Proceedings of the European Water Filtration Congress, Ostende (1993), Band 17

Gimbel, R.: Untersuchungen zur Partikelabscheidung in Schnellfiltern, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1978

Gimbel, R.: Abscheidung von Trübstoffen aus Flüssigkeiten in Tiefenfiltern, Veröffentlichungen des Bereichs und des Lehrstuhls für Wasserchemie und der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe, ZfGW-Verlag Frankfurt 1984

Gimbel R.: Neue Erkenntnisse zur weitergehenden Partikelentfernung, gwf Wasser Special 139 (1998), S. 43-50

Goldman, A. J., Cox, R. G., Brenner, H.: Slow Viscous Motion of a Sphere Parallel to a Plane Wall. I Motion through a Quiescent Fluid. II Couette Flow, Chem. Engng. Sci. 22 (1967), S. 637-660

Gregory, J.: Interaction of Unequal Double Layers at Constant Charge, J. Colloid Interface Sci 51 (1975), S. 44-51

Hamaker, H. C.: The London-van der Waals Attraction between Spherical Particles, *Physika* 4 (1937), S. 1058-1072

Hamielec, A. E.; Hoffman, T. W.: Numerical Solution of the Navier-Stokes Equation for Flow Past Spheres: Part I. Viscous Flow Around Spheres with and Without Radial Mass Flux, *A. I. Ch. E. Journal* 13 (1967), S. 212-219

Happel, J.: Viscous Flow in Multiparticle Systems: Slow Motion of Fluids Relative to Beds of Spherical Particles, *A. I. Ch. E.* 4 (1958), S. 197-201

Happel, Brenner: Low Reynolds Number Hydrodynamics, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, Bosten, Lancaster, 1986

Hilprecht, L.: Instationärer Impuls- und Stoffaustausch bei beschleunigter Bewegung von Einzelpartikeln, Dissertation, Technische Universität Berlin 1975

Hirsch, C.: Numerical Computation of Internal and External Flows, Volume 1, Fundamentals of Numerical Discretization, John Wiley & Sons, New York 1988

Hobby, R.: Entfernung organischer Störstoffe im Spurenbereich mit pulverförmiger Aktivkohle, Dissertation Gerhard-Mercator-Universität-Gesamthochschule Duisburg, 1995

Holloway, J. H.; Hollefeld, P. J.: Ultrasonic Cleaning of Deep-Bed Resins for Condensate Demineralizer Systems, American Power Conference 1971

Holzbecher, E.: Modellierung dynamischer Prozesse in der Hydrologie, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1996, S. 37

Hoog, R., Healy, T. W., Fuerstenau, D. W.: Mutual Coagulation of Colloidal Dispersions, *Trans. Faraday Soc.* 62 (1966), S.1638-1651

Hough, D. B.; White, L. R.: The Calculation of Hamaker Constants from Lifschitz Theory with Application to Wetting Phenomena, *Adv. Colloid Interf. Sci.* 14 (1980), S. 3-41

Israelachvili, J. N.: Adhesion Forces between Liquids and Condensed Vapours, *Surface Sci. Rep. (Amsterdam)* 14 (3) (1992), S. 109-159

Jenson, V. G.: Viscous Flow Around a Sphere at Low Reynolds Numbers (<40), *Proc. Roy. Soc. (London)* A 249 (1959), S.346-366

Johnson, R. L.; Cleasby, J. L.: Effekt of Backwash on Filter Effluent Quality, *ASCE Jour. Sanitary Engr. Div.* 92 (1966), S. 215-228

Kaulitzky, J., Gimbel, R.: Untersuchungen zur Spülung von körnigen Filtermaterialien in der Wasseraufbereitung-Teil 1, DVGW-Bericht, Dezember 1994

Kaulitzky, J., Gimbel, R.: Untersuchungen zur Spülung von körnigen Filtermaterialien in der Wasseraufbereitung-Teil 2, DVGW-Bericht, November 1995

- Kaulitzky, J. Gimbel, R.:** Synthetische Kollektoren - eine Alternative zu klassischen Filtrationsverfahren - Regeneration mit Ultraschall, In: Schriftenreihe des Wahnachtalsperrenverbandes, Band 5 (in redaktioneller Vorbereitung)
- Kawamura, S.:** Design and Operation of High-Rate-Filters - part 1, Journal AWWA 67 (1975a), S. 535-544
- Kawamura, S.:** Design and Operation of High-Rate-Filters - part 2, Journal AWWA 67 (1975b), S. 653-662
- Kludig, K.H.; Schürmann, G.:** Ein Beitrag zur Rückspülung von Filteranlagen I; gwf-wasser-abwasser 106 (1965), S. 371-378
- König, A.; Müller, H.-G.; Czekalla, C.:** Großversuch zum Einsatz von Pulverkohle in der Alsterschwimmhalle in Hamburg, Archiv des Badewesens 1 (1996) , S. 25-29
- Kunii, D. , Levenspiel, O.:** Fluidization Engineering, John Wiley & Sons Inc., New York-London-Sydney 1969
- Kuttruff, H.:** Physik und Technik des Ultraschalls, S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1988
- Lannin, T. E.:** Recycling Ion Exchange Resins, Power Engineering 79 (1975), H. 9, S. 52-54
- Lauterborn, W.:** Numerical investigation of nonlinear oscillations of gas bubbles in liquids, J. Acoust. Soc. America 59, 283 (1976)
- Lifschitz, E. M.:** The Theory of Molecular Attractive Forces between Solids, Soviet Physics 2 (1956), S. 73-83
- Maekelburg, D.:** Die hydraulisch wirksame Korngröße eng klassierter Schüttungen, gwf-Wasser/Abwasser 119 (1978), S.23-27
- Molerus, O.:** Druckverlust in Wirbelschichten, in: VDI-Wärmeatlas, 1984
- Moll, H.-G.:** Die Ermittlung der hinreichenden Rückspülgeschwindigkeit für Sand- und Kiesfilter, gwf-Wasser/Abwasser 119 (1978), S. 103-110
- Moll, H.-G.:** Über das Rückspülen von Mehrschichtfiltern, gwf-Wasser/Abwasser 121 (1980), S. 15-22
- Moll, H.-G.:** Die Expansion des Filtermaterials beim Spülen, gwf-Wasser/Abwasser 129 (1988), S. 412-416
- Moll, H.-G.:** Filterspülung mit Luft und Wasser - Teil 1, Neue DELIWA-Zeitschrift 41 (1990), S. 13-17
- Moll, H.-G.:** Filterspülung mit Luft und Wasser - Teil 2, Neue DELIWA-Zeitschrift 45 (1994), S. 4-6

Moll, H.-G.: Filterspülung mit Luft und Wasser - Teil 3, Neue DELIWA-Zeitschrift 47 (1996), S. 49-51

Mulder, T.: Untersuchungen zur Entwicklung permeabler Hohlkörperkollektoren zur Trübstoffabscheidung aus wäßrigen Lösungen in Schüttbettfiltern, Dissertation Universität - Gesamthochschule - Duisburg, 1990

Mulder, T., Gimbel, R.: Abscheidung von Trübstoffen aus wässrigen Lösungen an permeablen Hohlkörperkollektoren, Chem.-Ing.-Techn. 61 (1989), S. 566-567

Mulder, T., Gimbel, R.: Application of Permeable Collectors in Deep-Bed Filtration, Separations Technology 1 (1991), S. 153-165

Nahrstedt, A.; Gimbel, R.: Open Porous Collectors in Deep-Bed Filtration, Proc. of the Filtech Europe Conference, Karlsruhe (19.-21.10.1993)

Narsimhan, G.: On a Generalized Expression for Prediction of Minimum Fluidization Velocity, A. I. Ch. E. Journal 11 (1965), S. 550-554

Neale, G.; Epstein, N.; Nader, W.: Creeping Flow Relative to Permeable Spheres, Chem. Eng. Sci. 28 (1973), S. 1865-1874. (Erratum: Chem. Eng. Sci. 29 (1974), S. 1352)

O' Neill, M. E.: A Sphere in Contact with a Plane Wall in a Slow Linear Shear Flow, Chem. Eng. Sci. 23 (1968), S. 1293-1298

Nierschel, H., Polzer, S.: Strömungstechnisches Verhalten einzelner Partikel in wandnahen Grenzschichten, CIT 68 (1996), S. 409-412

Oertel, H.; Laurien, E.: Numerische Strömungsmechanik, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1995

Pfeffer, R., Happel, J.: An Analytical Study of Heat and Mass Transfer in Multiparticle Systems at Low Reynolds Numbers, AIChE J. 10 (1964), S. 605-611

Plesset, M.; Prosperetti, A.: Bubble Dynamics and Cavitation, Ann. Rev. Fluid Mech. 9 (1977), S. 145-185

Rajagopalan, R., Tien, C.: Trajectory Analysis of Deep Bed Filtration with the Sphere-in-Cell Porous Media Model, AIChE J. 22 (1976), S. 523-533

Raveendran, P., Amirtharajah, A.: Role of Short-Range Forces in Particle Detachment during Filter Backwashing, Journal of environmental engineering 121 (1995), S. 860-868

Richardson, J. F.; Zaki, W. N.: Sedimentation and Fluidization, Part 1, Trans. Inst. Chem. Engrs. 32 (1954), S. 35-53

Rubin, G.: Widerstands- und Auftriebsbeiwerte von ruhenden, kugelförmigen Partikeln in stationären, wandnahen laminaren Grenzschichten, Dissertation Universität Karlsruhe 1977

Ryan, J., Gschwend, P. M.: Effect of Ionic Strength and Flow Rate on Colloid Release: Relating Kinetics to Intersurface Potential Energy, *J. Colloid Interface Sci* 164 (1994), S. 21-34

Schade, H.; Kunz, E.: Strömungslehre, Walter de Gruyter, 1989, S. 347

Schoenen, D.: Beitrag der Desinfektion zur Sicherung eines seuchenhygienisch einwandfreien Trinkwassers, *gwf Wasser Special* 139 (1998), S. 51-58

Sehn, P.: Zum Einfluß von Polyelektrolyten auf die Partikelhaftung in wässrigen Systemen, Dissertation, Universität Karlsruhe (1984)

Sharma, M., Chamoun, H., Sita Rama Sarma, D. S. H., Schechter, R. S.: Factors Controlling the Hydrodynamic Detachment of Particles from Surfaces, *J. Colloid Interface Sci* 149 (1992), S. 121-134

Sonntag, H., Streng, K.: Coagulation Kinetics and Structure Formation, Plenum Press, New York-London, 1987

Strauss, S. D.: Optimizing Deep-Bed Performance, *Power* 125 (1981), S. 107-108

Than, V. R.; Yao, C. C.; Tien, C.: Flow Effects in Granular Filtration, *Journal of The Chin. I. Ch. E.* 20 (1989), S. 209-223

Tien, C.: Granular Filtration of Aerosols and Hydrosols, Butterworth, Boston 1989

Valencia, J. A., Cleasby, J. L.: Velocity Gradients in Granular Filter Backwashing, *J. AWWA* 71 (1979), S. 732-738

Visser, J.: On Hamaker Constants: a Comparison between Hamaker Constants and Lifshitz-van der Waals Constants, *Advances in Colloid and Interface Sci.* 3 (1972), S. 331-363

Visser, J.: Adhesion of Colloidal Particles, in: *Surface and Colloid Science*, Ed.: E. Matijevic, Wiley, New York 1976

Wen, C. Y., Yu, Y. H.: A General Method for Predicting the Minimum Fluidization Velocity, *A. I. Ch. E. Journal* 12 (1966), S. 610-612

Wu, R. M.; Lee, D. J.: Hydrodynamic Drag Force Exerted on a Moving Floc and its Implication to Free-Settling Tests, *Wat. Res.* 32 (1998), S. 760-768