

**Untersuchungen zur Regeneration
herkömmlicher und neuartiger
Filtermaterialien
zur
Tiefenfiltration trübstoffbelasteter Wässer**

Vom Fachbereich Maschinenbau der
Gerhard-Mercator-Universität - Gesamthochschule Duisburg
zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

genehmigte Dissertation

von

Jörg Kaulitzky
aus
Duisburg

Referent: Prof. Dr.-Ing. Rolf Gimbel
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Dieter Hänel
Tag der mündlichen Prüfung: 24.03.1999

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Verfahrenstechnik/Wassertechnik des Fachbereichs Maschinenbau an der Gerhard-Mercator-Universität - GH Duisburg im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projektes zur Kollektorreinigung entstanden.

Die Anregung zu dieser Arbeit erhielt ich während meiner ca. 3,5 jährigen Tätigkeit am Institut für Wasserforschung GmbH (IWW) durch den Leiter des Bereichs Wassertechnologie und gleichzeitig Fachgebietsleiter der Verfahrenstechnik/Wassertechnik der Universität Duisburg, Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Gimbel. Für diese Anregung und die stets wohlwollende Förderung der Arbeit während der Promotionsphase möchte ich mich bei Ihm sehr herzlich bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. D. Hänel vom Institut für Verbrennung und Gasdynamik der Universität Duisburg möchte ich ebenfalls sehr herzlich für die Übernahme des Korreferates und die damit verbundenen Mühen und Umstände danken. Seine Vorlesung zur Numerischen Fluidodynamik hat mich ganz maßgeblich zur Lösung der Navier-Stokes Gleichungen angeregt.

Aufgrund der Anbindung des IWW als Aninstitut an die Universität Duisburg konnte ich auch die technischen und analytischen Möglichkeiten des IWW für meine Arbeit nutzen, wofür ich mich bei der Geschäftsführung des IWW bedanke. Weiterer Dank gilt meinem Kollegen Herrn Dr.-Ing. Nahrstedt, der mich in konstruktiven Gesprächen inspiriert hat.

Einen nicht unwesentlichen Beitrag zum Gelingen der Arbeit sehe ich auch in den qualitativ hochwertigen Analysen, die mit hohem Anspruch und Engagement durchgeführt wurden. Dem Laborpersonal gilt daher mein ganz besonderer Dank.

In der oftmals anstrengenden Phase der Promotion fand ich in meiner lieben Susanne eine verlässliche und verständnisvolle Stütze, wofür Wortes des Dankes allein keinen Ausgleich schaffen können. Abschließend möchte ich noch einen Dank an meinen langjährigen Zimmerkollegen Herrn Lakmann richten, der insbesondere durch seine humorvolle Art zu einem angenehmen Arbeitsklima beigetragen hat.

Duisburg, im März 1999

Jörg Kaulitzky

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| 1. EINLEITUNG | 1 |
| 1.1 PROBLEMSTELLUNG..... | 1 |
| 1.2 ZIELSETZUNG..... | 3 |
| 2. STAND DES WISSENS..... | 4 |
| 3. THEORETISCHE GRUNDLAGEN..... | 8 |
| 3.1 GRUNDLAGEN ZUR PHYSIK DER WASSERSPÜLUNG VON TIEFENFILTERN | 8 |
| 3.2 KRÄFTE BEI DER PARTIKELHAFTUNG..... | 11 |
| 3.2.1 Van der Waals-Kraft | 12 |
| 3.2.2 Die elektrische Doppelschicht..... | 13 |
| 3.2.2.1 Grundlagen zur elektrischen Doppelschicht..... | 14 |
| 3.2.2.2 Doppelschichtkräfte | 16 |
| 3.2.3 Born'sche Abstoßungskräfte | 17 |
| 3.2.4 Hydratationskräfte | 18 |
| 3.3 ABLÖSUNG HAFTENDER PARTIKELN | 18 |
| 3.3.1 Hydrodynamische Ablösung an ebenen Oberflächen | 19 |
| 3.3.2 Hydrodynamische Ablösung im Filterbett | 24 |
| 3.4 SCHLUßFOLGERUNGEN FÜR DIE ABLÖSUNG..... | 26 |
| 4. DETERMINISTISCHE ANSÄTZE FÜR HERKÖMMLICHE TIEFENFILTER..... | 28 |
| 4.1 MODELLIERUNG DER STRÖMUNGEN IM FILTERBETT BEI SCHLEICHENDEN BEDINGUNGEN | 28 |
| 4.1.1 Druck und Schergradient auf der Kollektor bzw. Kugeloberfläche..... | 31 |
| 4.1.2 Druckverluste in der Zelle und im Filterbett..... | 33 |
| 4.1.3 Strömungskräfte auf einen kugelförmigen Kollektor | 34 |
| 4.1.4 Betaausdehnung und Schergradienten im fluidisierten Bett..... | 36 |
| 4.2 ERWEITERUNG FÜR GROBE REYNOLDSZAHLEN | 38 |
| 4.2.1 Anfangs- und Randbedingungen | 40 |
| 4.2.2 Auswirkungen steigender Reynoldszahlen | 42 |
| 4.2.3 Einfluß des instationären Anfahrvorganges..... | 44 |
| 4.3 EIN MODIFIZIERTES ZELLENMODELL | 45 |
| 4.4 DISKUSSION DER STRÖMUNGSMODELLE..... | 47 |
| 5. STRÖMUNGSMODELLE FÜR PERMEABLE KOLLEKTOREN..... | 49 |
| 5.1 SCHLEICHENDE STRÖMUNGEN..... | 49 |
| 5.1.1 Druckverlust und Betaausdehnung von PSK | 51 |
| 5.2 STRÖMUNGSMODELL FÜR GRÖßERE REYNOLDSZAHLEN | 55 |
| 5.3 NUMERISCHES LÖSUNGSVERFAHREN FÜR DAS MODELL DER PERMEABLEN KUGEL | 58 |
| 5.4 VERGLEICH DER STRÖMUNGSMODELLE..... | 60 |
| 6. UNTERSUCHUNGEN MIT KOLLEKTORMATTEN..... | 63 |
| 6.1 EIGENSCHAFTEN VON KOLLEKTORMATTEN..... | 64 |
| 6.1.1 Die innere Struktur der Kollektormatten | 64 |
| 6.1.2 Druckverlust..... | 67 |
| 6.2 FILTRATIONSVERSUCHE MIT KOLLEKTORMATTEN | 69 |
| 6.3 DER FILTERPARAMETER EINER KOLLEKTORMATTE..... | 71 |
| 6.3.1 Ermittlung des Filterparameters aus Beladungsversuchen | 71 |
| 6.3.2 Anpassung der Meßwerte | 72 |
| 6.4 VERSUCHE ZUR REGENERATION | 75 |
| 6.5 MODELLIERUNG DER TRÜBSTOFFABLÖSUNG IN KOLLEKTORMATTEN..... | 77 |

| | |
|---|------------|
| 7. BELADUNG DER PERMEABLEN KOLLEKTOREN | 81 |
| 7.1 BESCHREIBUNG DER VERSUCHSANLAGE | 81 |
| 7.1.1 <i>Kontinuierliches Meßverfahren zur Konzentrationsbestimmung</i> | 83 |
| 7.1.2 <i>Das komprimierte Filterbett</i> | 84 |
| 7.2 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUR ABSCHIEDUNG | 85 |
| 7.3 MATHEMATISCHE MODELLIERUNG DER ABSCHIEDUNG IM PSK-TIEFENFILTER | 86 |
| 7.3.1 <i>Konzentrations- und Beladungsverteilung im PSK</i> | 86 |
| 7.3.2 <i>Abscheideleistung von PSK</i> | 87 |
| 7.3.3 <i>Ermittlung des Kollektorabscheidegrades</i> | 88 |
| 7.3.4 <i>Vergleich der Abscheidung in Experiment und Modell</i> | 89 |
| 7.3.5 <i>Verteilung der Konzentration und Beladung im PSK</i> | 93 |
| 8. SPÜLUNG VON PSK MIT WASSER | 97 |
| 8.1 BETTAUSDEHNUNG UND SEDIMENTATION VON PSK | 97 |
| 8.2 ABLÖSUNG DER BELADUNG DURCH EINE WASSERSPÜLUNG | 100 |
| 8.3 MODELLVORSTELLUNG ZUR TRÜBSTOFFABLÖSUNG BEI PSK | 105 |
| 8.3.1 <i>Berechnung des ablösbaren Beladungsanteils</i> | 107 |
| 8.3.2 <i>Vergleich zwischen Modell und Experiment</i> | 107 |
| 8.3.3 <i>Weiterführende Erkenntnisse aus den Modellrechnungen</i> | 111 |
| 9. REGENERATION MIT ULTRASCHALL | 114 |
| 9.1 VERSUCHE ZUR ULTRASCHALLREINIGUNG | 116 |
| 9.2 VERSUCHSERGEBNISSE ZUR ULTRASCHALLREINIGUNG | 117 |
| 9.3 MECHANISMEN DER TRÜBSTOFFABLÖSUNG DURCH ULTRASCHALL | 121 |
| 10. ZUSAMMENFASSUNG | 125 |
| VERWENDETE FORMELZEICHEN | 130 |
| VERZEICHNIS DER VERWENDETEN ABKÜRZUNGEN | 137 |
| LITERATUR | 138 |

| | |
|---|------------|
| ANHANG | 144 |
| A3: DEFINITIONEN EINIGER GRÖßEN AUS DER FILTRATIONSTECHNIK | 144 |
| A4: ANMERKUNGEN ZUR LÖSUNG DER STRÖMUNGSGLEICHUNG | 145 |
| A4.1: <i>Die Wirbeltransportgleichung für Kugelumströmungen</i> | 145 |
| A4.2: <i>Das Strömungsgitter</i> | 148 |
| A4.3: <i>Vergleich der numerischen Lösungen mit bekannten Ergebnissen</i> | 150 |
| A4.4 <i>Randbedingung am Rand der Happel-Zelle</i> | 152 |
| A5: STRÖMUNGEN MIT PERMEABLEN KUGELN | 153 |
| A 5.1: <i>Faktoren A bis H für das Modell der permeablen Kugel</i> | 153 |
| A5.2 <i>Die Strömungsgitter für die permeable Kugel</i> | 154 |
| A6: VERSUCHE MIT DER TESTZELLE FÜR KOLLEKTORMATTEN | 156 |
| A6.1: <i>Druckverlustmessungen bei Kollektormatten</i> | 156 |
| A6.2: <i>Versuche zur Filtration mit Kollektormatten</i> | 157 |
| A6.3: <i>Spülversuche mit Kollektormatten</i> | 161 |
| A7: KALIBRIERKURVE FÜR DIE TRÜBUNGSMESSUNG | 162 |
| A8: BELADUNGSFORM DER INNEREN OBERFLÄCHE DER PSK | 163 |
| A9: THEORETISCHE GRUNDLAGEN ZUM ULTRASCHALL..... | 164 |
| A9.1: <i>Beziehungen im linearisierten Schallfeld</i> | 166 |
| A9.2: <i>Kavitation im Ultraschallfeld</i> | 167 |

1. Einleitung

Die Tiefenfiltration mit der Zielsetzung feinste, suspendierte Feststoffe aus dem Rohwasser zu entfernen, ist als der zentrale Aufbereitungsschritt zur Herstellung eines hochwertigen Trinkwassers anzusehen (z. B. GIMBEL, 1998). Dies gilt insbesondere dann, wenn Oberflächenwasser zur Herstellung von Trinkwasser eingesetzt werden muß. SCHOENEN (1998) stellt in diesem Zusammenhang die hohe Bedeutung der Filtration für die Versorgung mit seuchenhygienisch einwandfreiem Trinkwasser heraus. Er macht deutlich, daß ein Mangel bei der Aufbereitung, womit Verfahren zur Abtrennung der als Partikel aufzufassenden Bakterien, Viren und Parasiten gemeint sind, nicht oder nur in einem ganz beschränktem Maße durch eine abschließende Desinfektion ausgeglichen werden kann.

Während früher nahezu ausschließlich natürliche Quarzsande als Schüttungsmaterial für Tiefenfilter eingesetzt wurden, führten steigende Anforderungen an die Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zur Verwendung von Filtermaterialien mit zunehmender Strukturierung der Kornoberflächen, wie bspw. Bims und Filterkoks. GIMBEL (1984) zeigte, daß mit steigender Strukturierung der Kornoberflächen die Abscheideleistung des Tiefenfilters zunimmt. Eine gedankliche Weiterentwicklung zur Strukturierung der Filterkornoberflächen und einer damit erwarteten Verbesserung der Abscheideleistung führte u. a. zur Entwicklung eines Kollektors mit extrem großer Kollektorporosität (MULDER und GIMBEL, 1991). Die Kollektoroberfläche degeneriert dabei zu einem System aus vielen Faseroberflächen, auf denen die Abscheidung stattfindet. Im Gegensatz zu massiven Kollektoren kann und soll im Fall des permeablen Kollektors ein Teil des zu filtrierenden Fluidstromes den Kollektor durchströmen (permeieren). Die Eigenschaft der Permeabilität und die Notwendigkeit diesen Kollektor synthetisch herzustellen, führten zu seinem Namen: Permeabler Synthetischer Kollektor (PSK).

Die Vorteile, die durch eine zunehmende Strukturierung der Kollektoroberflächen zu höheren Abscheideleistungen führen, können durch eine unzureichende Regeneration des Filterbettes verloren gehen und die Einsetzbarkeit grundsätzlich in Frage stellen. Als Ursache kommen zunächst nicht bzw. nur unzureichend entfernbare Beladungen in Betracht, die die Oberflächenstrukturen mit zunehmender Betriebsdauer überdecken. Diese Überlegung macht deutlich, daß ein effektives Regenerationsverfahren insbesondere bei stark strukturierten Kollektoroberflächen zur Erhaltung einer guten Abscheideleistung von großer Bedeutung ist.

1.1 Problemstellung

Während des Filtrationsprozesses wird eine mehr oder weniger große Teilmenge der suspendierten Partikeln innerhalb einer Filterschicht auf den Oberflächen des Filtermaterials fixiert und somit dem Filtratstrom entzogen. Die Partikelabscheidung beruht auf einem

komplizierten Wechselspiel unterschiedlicher Transport- und Haftmechanismen, die insbesondere von den physikalisch-chemischen Eigenschaften der Trübstoffe, dem umgebenden Wasser mit seinen gelösten Inhaltsstoffen, den physikalisch-chemischen Eigenschaften der eingesetzten Filtermaterialien sowie von den Strömungsbedingungen in der Filterschicht abhängen (GIMBEL, 1998).

Mit zunehmender Filtrationsdauer steigt die auf den Kollektoroberflächen abgeschiedene Partikelmasse an und führt schließlich zu einer Erschöpfung der Trübstoffaufnahmekapazität des Filters, die das Ende eines Filtrationszyklus bedeutet. Der Filtrationsphase, die i. d. R. zwischen einem Tag und etwa einer Woche liegen kann, folgt nun ein nur wenige Minuten dauernder Regenerationsschritt zur Wiederherstellung der Abscheideleistung. Dazu wird partikelfreies Wasser, das in der Regel hochwertiges Trinkwasser ist, in der Größenordnung von ca. 1-10% der filtrierte Wassermenge zur Regeneration des Filters verbraucht (DVGW W212).

Die Regeneration herkömmlicher, körniger Filtermaterialien wird in der Regel in mehreren Spülschritten durchgeführt, in denen eine Spülung mit den Medien Luft und Wasser entweder allein oder gleichzeitig entgegen der Schwerkraftrichtung durchgeführt wird. In der Reihenfolge der sogenannten Spülprogramme steht zu Beginn häufig die Spülung mit Luft, dann mit Luft und Wasser und schließlich nur mit Wasser.

Das Ziel des Regenerationsschrittes muß es insbesondere sein, die auf dem Filtermaterial abgeschiedene Beladung möglichst vollständig, jedoch zumindest soweit zu entfernen, daß der Anfangsfilterwiderstand null bzw. vernachlässigbar klein ist. Weiterhin darf sich die Filterlaufzeit nicht durch zurückgebliebene Beladungsreste oder eingeschlossene Luftvolumina verkürzen und die Filtratqualität verschlechtern. Darüber hinaus sollen die anfallenden Investitions- und Betriebskosten möglichst gering ausfallen, was impliziert, daß die aufzuwendende Spülwassermenge möglichst gering zu halten ist.

Viele Störungen bei der Tiefenfiltration lassen sich auf unsachgemäße Spülungen zurückführen. Diese reichen von Austrag und damit Verlust von Teilen des Filtermaterials mit dem Spülwasserstrom, über Kornwachstum und Verkeimung des Filtermaterials bis hin zu verkürzten Filterlaufzeiten und schlechten Abscheideleistungen. Maßgeblich sind an dieser Situation ein weitverbreitetes Unverständnis über die bei der Regeneration ablaufenden physikalischen Mechanismen verantwortlich. Es wird vielfach diskutiert, welche Spülgeschwindigkeit zur Reinigung des Filtermaterials erforderlich ist und welche Bedeutung dabei den Kollektor- und den Strömungsparametern zukommt.

Für das neuartige Filtermaterial, den permeablen synthetischen Kollektoren (PSK) sind bisher noch keine Spülprogramme entwickelt worden, die eine jederzeit ausreichende Regeneration sicherstellen können. Grundlegende Untersuchungen zur Entwicklung eines geeigneten

Spülverfahrens sind erforderlich, wobei ein vertieftes Verständnis der ablaufenden Mechanismen zur Vermeidung von Störungen und Möglichkeiten zur Optimierung des Verfahrens erforderlich ist. Grundsätzlich ist es wünschenswert, die permeablen Kollektoren auf herkömmliche Weise mit einer Spülung im Aufstrom im Filtrationsraum zu regenerieren. Das Verfahren ist sehr einfach, mit geringen Investitionskosten behaftet und von herkömmlichen Filtermaterialien bekannt, so daß es von daher auf eine breite Akzeptanz stoßen würde. Sollte eine herkömmliche Wasserspülung keine erfolgversprechenden Ergebnisse liefern, so sollte ein Verfahren verfügbar sein, daß eine hinreichende Regeneration sicherstellen kann.

1.2 Zielsetzung

Um ein vertieftes Verständnis der Mechanismen, die bei der Regeneration von Filtermaterialien zur Tiefenfiltration ablaufen, zu gewinnen, sollen auf der Basis bisheriger Arbeiten die wesentlichen Einflußgrößen auf den Regenerationsprozeß herausgearbeitet werden. Dabei sollen sich die Untersuchungen auf die reine Wasserspülung als Reinigungsschritt beschränken. In die Untersuchungen sind Überlegungen zur Beeinflussung der Haftung nur am Rande miteinzubeziehen, so daß der Schwerpunkt auf die Ablösevorgänge der Beladung gelegt werden soll.

Im weiteren sollen für die neuartigen PSK grundlegende Untersuchungen zu ihrer Regeneration unter Einbeziehung der an herkömmlichen Filtermaterialien erkannten Prinzipien und Mechanismen durchgeführt werden. Es ist durch experimentelle Untersuchungen an einem Modellsystem zu prüfen und mit numerischen Simulationen zu bestätigen, inwieweit durch eine Wasserspülung eine Regeneration der permeablen Kollektoren vorgenommen werden kann. Um die Ausgangssituation der Simulation zur Ablösung korrekt vorzugeben, ist die Beladungsverteilung im permeablen Kollektor durch Simulation des Filtrationsprozesses zu ermitteln. Darüber hinaus soll die Verwendbarkeit von Ultraschall zur Regeneration der permeablen Kollektoren experimentell geprüft werden.

Insgesamt sollen die experimentellen und theoretischen Untersuchungen zur Regeneration mit einer Wasserspülung und Ultraschall darüber Aufschluß geben, welchen Einfluß die Kollektorparameter auf den Regenerationsprozeß haben. Es soll zum einen erkennbar werden, wie die Verfahrensparameter der Regeneration für einen bestimmten Kollektor eingestellt werden müssen, woraus sich insbesondere die Wirtschaftlichkeit der Verfahren abschätzen lassen soll. Zum anderen soll damit auch die Möglichkeit geschaffen werden, neben maximalen Abscheideleistungen auch die Regeneration als Kriterium zur Auswahl eines synthetischen Kollektors für eine definierte Filtrationsaufgabe einbeziehen zu können.

2. Stand des Wissens

Der Regeneration von Schüttbettfiltern aus herkömmlichen, körnigen Filtermaterialien wurde in der Vergangenheit im Vergleich zu den bei der Filtration ablaufenden Abscheidvorgängen bedeutend weniger Aufmerksamkeit beigemessen. Dies mag erklären, warum sehr grundlegende und umfassende Theorien vergleichbar der Filtrationstheorie bisher nicht bekannt sind. Dabei kommt der Regeneration des Filters insbesondere auch aus ökonomischer Sicht große Bedeutung zu, da durch sie die Betriebskosten einer Filteranlage wesentlich mitbestimmt werden. So zeigten bspw. KÖNIG et al. (1996) in einer Kostenabschätzung für die Betriebskosten einer Pulverkohleanwendung in Schwimmbädern, daß bei Filterlaufzeiten von zwei Tagen das erforderliche Spülwasser zu einem Kostenanteil von ca. 80% beiträgt. Im weiteren können die Kosten für die Einrichtungen zur Regeneration des Filtermaterials bis zu 50% der Investitionskosten der Filteranlage ausmachen (KAWAMURA, 1975a).

Der Regenerationsvorgang, der bei herkömmlichen Filtermaterialien durch eine Spülung des Filterbettes im Aufstrom mit den Spülmedien Luft und Wasser erfolgen kann, wird häufig durch eine Spülung mit Luft eingeleitet. Es kann sich ein weiterer Spülschritt bei gleichzeitiger Verwendung der Spülmedien Luft und Wasser anschließen, der als Luft-Wasser-Spülung bezeichnet wird. In dem letzten Spülschritt, häufig auch als Klarspülung bezeichnet, wird mit dem Spülmedium Wasser insbesondere die bereits abgelöste Beladung aus dem Filter heraustransportiert. Das gesamte Spülprogramm dauert in der Regel nicht länger als 15 Minuten.

In vielen Arbeiten wurde insbesondere der Voraussage des Lockerungspunktes und der Betausdehnung für die verschiedenen Filtermaterialien große Bedeutung beigemessen (vgl. Kapitel 3.1), während der sehr komplexe Ablöseprozeß bestenfalls durch makroskopische Ansätze modelliert wurde. KLUDIG u. SCHÜRMAN (1965) haben als Ursachen für die Ablösung Reibungs- und Kollisionsvorgänge fluidisierter Filterkörner vermutet. Für diesen Mechanismus hält KAWAMURA (1975b) eine Spülung mit 10 % der Sedimentationsgeschwindigkeit der Filterkörner für optimal, da hierbei die Möglichkeit des Kontaktes einzelner Körner am größten sei. Dies entspricht bei typischen Sandfiltern einer Betausdehnung von ca. 37 %, was praktischen Erfahrungen nahe kommt. Dagegen vertreten CLEASBY et al. (1977) die Auffassung, daß hydrodynamische Kräfte als Hauptmechanismus für die Abreinigung der Filterkörner verantwortlich sind. Von AMIRTHARAJAH (1978) ist für diesen Ablösemechanismus eine Modellvorstellung basierend auf einer makroskopischen Energiebilanz entwickelt worden, aus der sich eine optimale Bettexpansion zur Erzielung maximaler hydrodynamischer Scherkräfte ergibt (vgl. Kapitel 3.3.2). Für den Fall eines Filtersandes berechnet sich aufgrund der Theorie von AMIRTHARAJAH eine optimale Bettexpansion von 80-100%. CLEASBY (1977) räumt aufgrund der sehr großen Betausdehnung ein, daß das Maximum der hydrodynamischen Scherkräfte in Abhängigkeit

der Betausdehnung nur schwach ausgeprägt ist, so daß bei den von ihm zitierten experimentellen Untersuchungen von JOHNSON und CLEASBY (1966) eine optimale Abreinigung der Filterkörner bei einer Betausdehnung von lediglich 16-18 % gefunden werden konnte.

Zur Verbesserung der Abreinigung der Filterkörner wird der reinen Wasserspülung häufig eine Luft- sowie eine Luft-Wasser-Spülung vorgeschaltet, sofern dieser Vorgehensweise (z. B. aufgrund starkem Abriebs an den Filterkörnern, unerwünschten Vermischungen bei der Mehrschichtfiltration sowie Austrag von Filterkörnern) keine Grenze gesetzt ist. AMITHARAJAH (1984) beschreibt den Abreinigungsmechanismus bei der kombinierten Luft-Wasser-Spülung durch kurzzeitiges "Aufblasen" von Hohlräumen, die anschließend durch Ablassen der Luft im Scheitel der Blasen wieder in sich zusammensacken (*collapse pulsing*). Dabei treten während des Kollabierens der Blasen maximale Scherkräfte auf, die zusammen mit der Größe der Relativbewegung zwischen den Filterkörnern als entscheidende Parameter für den Ablösevorgang angesehen werden. Er leitet ausgehend von Gesetzen der Bodenmechanik und der Durchströmung poröser Medien eine Gleichung für die Entstehung von *collapse pulsing* ab. Nach Ansicht von ADDICKS (1987) wird die beste Filterreinigung bei einer Luft-Wasser-Spülung mit Geschwindigkeitskombinationen erzielt, die um den Dreiphasen-Lockerungspunkt liegen. FITZPATRICK (1993) untersuchte die Vorgänge bei der Spülung, insbesondere beim *collapse pulsing*, durch ein ins Filterbett eingeführtes Endoskop, das mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gekoppelt wurde. Sie kommt zu dem Schluß, daß für die kombinierte Luft-Wasser-Spülung im Zustand des *collapse pulsing* (40 - 50 % der Lockerungsgeschwindigkeit) optimale Reinigungsergebnisse erreicht werden. Dieses Ergebnis wird ihrer Meinung nach durch einen hohen Bewegungsgrad des Bettes sowie den hohen Geschwindigkeiten der Körner, woraus große Scherkräfte und Kollisionsenergien resultieren, erzielt. Darüber hinaus tragen auch Abrasionseffekte bei der Bettkontraktion zur Ablösung der Trübstoffe bei.

MOLL (1990) untersuchte die Reinigungswirksamkeit verschiedener Spülprogramme bestehend aus einer Luftspülung, Luft-Wasser-Spülung und einer abschließenden Wasserspülung bei einem Filtersand der Körnung 1,25-1,8 mm, der durch eine biologische Enteisung beladen wurde. Als Kriterien für die Wirksamkeit des Spülprogramms verwendet MOLL den Anfangsdruckverlust bei erneut einsetzender Filtration nach dem Spülprogramm und die Filterlaufzeit, die er durch Erreichen eines maximalen Druckverlustes von 200 mbar definierte. Anhand dieser Kriterien zeigen die Untersuchungen von MOLL keine signifikanten Verbesserungen durch Einbeziehung einer Luft- oder Luft-Wasser-Spülung in das Spülprogramm im Vergleich zu einer reinen Wasserspülung. Deutliche Verbesserungen der Reinigungswirkung konnten dagegen durch Steigerung der Spülwassergeschwindigkeit bei der abschließenden Wasserspülung festgestellt werden. Aufgrund dieser Ergebnisse

versuchte MOLL (1994) den Einfluß der Spülwassergeschwindigkeit bei der Luft-Wasser-Spülung und der abschließenden Wasserspülung innerhalb des Spülprogrammes zu ermitteln. Er fand keine deutlichen Auswirkungen der Spülwassergeschwindigkeit bei der Luft-Wasser-Phase, während dagegen deutliche Auswirkungen der Spülwassergeschwindigkeit wie in den vorherigen Untersuchungen (MOLL, 1990) bei der abschließenden Wasserspülung zu erkennen sind. In weiteren Untersuchungen kommt MOLL (1996) zu dem Ergebnis, daß der Effekt des *collapse pulsing*, wie er von AMIRTHARAJAH (1984) bei der Luft-Wasser-Spülung beschrieben wird, für die Praxis der Filterspülung von untergeordneter Bedeutung ist. In seiner Schlußfolgerung geht MOLL von der Voraussetzung aus, daß in der abschließenden Wasserspülung die Spülwassergeschwindigkeit zwischen der 1,5 und 2-fachen Lockerungsgeschwindigkeit gewählt wird. Einen deutlichen Effekt des *collapse pulsing* findet MOLL allerdings dann, wenn in der abschließenden Wasserspülung nicht mehr als die halbe Lockerungsgeschwindigkeit eingesetzt wird.

Von KAULITZKY (1994,1995) wurde an einem Versuchsfilter im halbtechnischen Maßstab untersucht, welche Bedeutung die Spülwassergeschwindigkeit auf die Entfernung von Luftblasen hat, die nach einer Luftspülung oder Luft-Wasser-Spülung im Filterbett zurückgehalten werden. Es konnte für verschiedene Materialien gezeigt werden, daß ein vollständiger Austrag der eingeschlossenen Luft erst geringfügig oberhalb der Lockerungsgeschwindigkeit möglich ist. Eine effektive Entfernung mit minimalem Spülwasserverbrauch stellte sich erst bei einer Spülung mit einer 1,5 bis 2-fachen Lockerungsgeschwindigkeit ein.

RAVEENDRAN und AMIRTHARAJAH (1995) berichten über experimentelle Untersuchungen zur Ablösung einer Beladung aus Latex-Partikeln von einem Glaskugelbett unter der Wirkung einer Wasserspülung mit Fluidisierung des Filterbettes. Die Autoren zeigten, daß durch die Ionenstärke und den pH-Wert des Spülwassers der Anteil der abgelösten Beladung beeinflußt wird. Mit zunehmender Ionenstärke und abnehmendem pH-Wert vermindert sich der abzulösende Anteil der haftenden Latex-Partikeln, so daß eine zunehmende Beladung nach der Spülung auf dem Filtermaterial verbleibt. Der Einfluß der Ionenstärke scheint für die meisten praktischen Anwendungen von untergeordneter Bedeutung zu sein, da bei einer Verzehnfachung der Ionenstärke lediglich 6% (Volumenprozent) der Anfangsbeladung weniger abgelöst werden können. Dagegen führt eine Veränderung des pH-Wertes im trinkwasserrelevanten Bereich von 6 auf 9 zu einer Zunahme des abzulösenden Volumenanteils der Beladung um ca. 7%.

Ein neuartiges Verfahren zur Regeneration verschmutzter Schüttbettfilter wurde für Ionenaustauscherharze entwickelt (HOLLOWAY, 1971, LANNIN, 1975, STRAUSS, 1981), die in der Kondensat-Aufbereitung bei Kraftwerksanlagen zur Energiegewinnung eingesetzt

wurden. Dort stand man vor dem Problem, daß die bei Tiefenfiltern üblicherweise verwendete Rückspültechnik nicht die gewünschten Reinigungsergebnisse lieferte und darüber hinaus große Mengen Spülwasser produzierte. Die Spülwässer waren unangenehmerweise durch die Wirkung der Austauscherharze meist stark sauer. Darüber hinaus waren insbesondere die Betreiber von Atomkraftwerken aufgrund steigender Umweltschutzaufgaben an minimalen Abwassermengen interessiert. Mit dieser Zielsetzung wurde von der General Electric Company ein neues Verfahren zur Regeneration körniger Austauscherharze durch Ultraschall entwickelt. Zur Abreinigung wird das hauptsächlich mit Eisenoxid (Fe_2O_3) beladene Harz von oben in eine stählerne, filterähnliche Waschkammer eingeführt. Während der Sedimentationsphase der körnigen Harze in der Waschkammer erfolgt die Abreinigung in einem quer zur Sinkrichtung angebrachten Ultraschallfeld. Durch eine leichte Aufwärtsspülung kann die Aufenthaltszeit der Harze im Ultraschallfeld gesteuert und abgelöste Teilchen abtransportiert werden. Untersuchungen an einer halbtechnischen Versuchsanlage (HOLLOWAY, 1971) zeigten gute Reinigungsergebnisse bei verringertem Spülwasseraufkommen. Die Möglichkeit zur Ultraschallreinigung von Tuchfiltergeweben bei einer kuchenbildenden Filtration wurde von EHRFELD et al. (1994) untersucht. Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, daß durch den Ultraschall ein Reinigungsergebnis erzielt werden kann, deren Effizienz durch andere mechanische Methoden nicht erreicht wird. Im weiteren werden derzeit auch der Einsatz der Ultraschalltechnologie zur Regenerierung von Brunnen vorgeschlagen (BERLITZ und KÖGLER, 1997), die z. B. aufgrund einer Verockerung keine ausreichende Förderleistung mehr besitzen. Über Versuche oder Untersuchungsergebnisse zur Brunnenregeneration berichten die Autoren allerdings nicht.

Im weiteren wird über Untersuchungen zur Abreinigung trübstoffbeladener Materialien, wie sie für die permeablen Kollektoren eingesetzt werden, in der Literatur nicht berichtet. Dies ist auch verständlich, da der Einsatz permeabler Kollektoren in Tiefenfiltern zur Trübstoffabscheidung eine völlige Neuentwicklung darstellt.