Rückspülbares Filtersystem für Drahterodiermaschinen

Projektbericht

Im Auftrag der
ABAG-itm GmbH
Gesellschaft für innovative Technologie- und Managementberatung
Stauferstr. 15
70736 Fellbach

Projektträger
AWR Filtersysteme GdbR
Fabrikstraße 9
79361 Sasbach a./K.

Projektbegleitung
Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft
Universität Stuttgart
Bandtäle 2
70569 Stuttgart

November 2000

Erarbeitung
Dr.-Ing. Wolf-Rüdiger Müller, Irene Frommert, Universität Stuttgart
Dipl.-Ing. Hermann Kißler, ABAG-itm GmbH

Für die kooperative Mitwirkung an diesem Projekt bedankt sich die ABAG-itm ganz besonders bei Herrn Thomas Weiner, AWR-Filtersysteme GdbR.

Die Durchführung dieses Modellprojekts sowie die wissenschaftliche Begleitung wurde mit Mitteln der Sonderabfallabgabe des Landes Baden-Württemberg unterstützt.

Herausgeber
ABAG-itm GmbH
Stauferstraße 15
70736 Fellbach
Tel.: 0711/951911-0
Fax: 0711/951911-20
E-mail: info@abag-itm.de
Internet: www.abag-itm.de

Projektleitung
Dipl.-Ing. Hermann Kißler

November 2000

Gedruckt auf: weiß matt gestrichen Offset chlorfrei gebleicht (Umschlag)

Alle Rechte der Verbreitung, auch durch Film, Funk und Fernsehen, fotomechanische Wiedergabe, auszugsweisen Nachdruck, oder Einspeicherung und Rückgewinnung in Datenverarbeitungsanlagen aller Art, sind vorbehalten.

Inhaltsverzeichnis

0 ZUSAMMENFASSUNG 2

1 STAND DER TECHNIK 4

1.1 Grundlagen 4

1.2 Anforderungen an das Wasser 6

1.3 Entnahme gelöster und ungelöster Stoffe 7
1.3.1 Gelöste Stoffe 7
1.3.2 Ungelöste Stoffe 8

2 BESCHREIBUNG DES PROJEKTES 19

2.1 Erwartete Weiterentwicklung 19

2.2 Optimierung der Anlage in Vorversuchen 20

3 UNTERSUCHUNGEN VOR ORT 21

3.1 Methoden 21

3.2 Praktischer Einsatz einer Pilotanlage 22

3.3 Ergebnisse 23

4 BEURTEILUNG DER ANLAGE, EMPFEHLUNGEN 26

5 WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG 27

5.1 Einführung 27

5.2 Erläuterungen und Randbedingungen zum Kostenvergleich 27

5.3 Kostenvergleich für eine und zwei Drahterodiermaschinen: Filterpatronen und rückspülbares Filtersystem 29

5.4 Schlussfolgerung 31

6 BEURTEILUNG DER ÜBERTRAGBARKEIT UND UMSETZUNG IN DIE PRAXIS 31

7 SCHRIFTTUMSVERZEICHNIS 32

8 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS 33

9 TABELLENVERZEICHNIS 33

10 ABBILDUNGSVERZEICHNIS 34

0 Zusammenfassung

Im Werkzeug- und Formenbau nimmt die Elektroerosion einen wichtigen Platz ein, da manche Bearbeitungsaufgaben in der Herstellung komplexer Formen erst durch ihren Einsatz überhaupt lösbar wurden. Bei den Erosionsverfahren wird im wesentlichen zwischen Senk- und Drahterodieren unterschieden.

Bei der Drahterosion wird deionisiertes Wasser als Dielektrikum und Spülmedium eingesetzt. Durch den Elektroerosionsprozess werden die bearbeiteten Werkstoffe (Metalle) abgetragen. Dieser Metalleintrag gelangt, sowohl in gelöster Form als auch ungelöst als Metallpartikel (im μm-Bereich), als Verunreinigung in das als Dielektrikum im Kreislauf geführte Wasser. Ohne ergänzende Pflegemaßnahmen wird jedes Dielektrikum schnell unbrauchbar. In der Praxis werden daher die gelösten Stoffe durch den Einsatz von Ionenaustauschern entfernt. Die Entnahme der Metallpartikel erfolgt durch geeignete Filtersysteme. Dabei werden noch immer vorrangig Papier- oder Kunststoff-Filterpatronen eingesetzt, die bei entsprechender Beladung regelmäßig ausgetauscht und im Allgemeinen als Sonderabfall zu beseitigen sind. Je nach Maschinentyp und Laufzeit werden im Jahr bis zu 200 Filterpatronen je Maschine benötigt.

Allein in Baden-Württemberg werden derzeit ca. 3.000 Drahterodiermaschinen betrieben. Aus den zu entsorgenden Filterpatronen resultiert ein Abfallvolumen von ca. 9.500 m³/a bzw. ca. 3.500 t/a. Verpackungsmaterialien der Filter sind dabei noch nicht berücksichtigt.

Beim Einsatz von hilfsmittelfreien Filtrationssystemen ließe sich die Abfallmenge auf den reinen Erodierschlamm reduzieren und zudem eine Verwertung ermöglichen.

Im Rahmen dieses Projekts wurde daher ein von der Firma AWR speziell für den Einsatz in der Drahterosion entwickeltes rückspülbares Filtersystem im praktischen Einsatz erprobt und optimiert. Das Funktionsprinzip basiert auf einem aus der Wasseraufbereitung bekannten System des Sandbettfilters. Zur Regenerierung wird dieser bei entsprechender Beladung zurückgespült. Der Filtervorgang wird dazu unterbrochen. Aus einem separaten Rückspültank wird das Wasser im Aufstrom durch den Quarzsandfilter gedrückt. Der Sand wird fluidisiert und die Schmutzpartikel ausgetragen. Durch eine redundante Filteranordnung wird der Erodierprozess nicht beeinflusst. Der rückgespülte Erodierschlamm kann nach Austropfen in einem Sackfilter auf nutzerfreundliche Art gesammelt und anschließend beseitigt werden. Bei weitgehend homogenem Bearbeitungsspektrum kann der anfallende Metallschlamm einer metallurgischen Verwertung zugeführt werden.

Ein Prototyp der Filtrationsanlage mit frei programmierbarer Steuerung der Prozessfolge wurde vor Ort (DaimlerChrysler, Sindelfingen) zur Gewinnung von Erfahrungen im kontinuierlichen Einsatz in einem Praxistest erprobt. Die flexible Anlagenkonzeption ermöglichte eine problemlose Nachrüstung und Anpassung der Steuerung an die beim Anwender vorhandene Erodiermaschine. Neben den Untersuchungen zur Filtrationsleistung wurden insbesondere Aspekte der Verfahrenssicherheit, Entnahmeleistung und Prozessstabilität berücksichtigt und beurteilt. Die erzielten Ergebnisse der getesteten Filtereinheit wurden als sehr gut beurteilt. Für den Anwender bestehen beim Einsatz rückspülbarer Filtrationssysteme gegenüber den herkömmlichen Filterpatronen folgende Vorteile:

- Eliminierung von Filterhilfsmitteln (Patronen), sowohl auf der Einkaufs- als auch auf der Entsorgungsseite,

- Reduzierung der Abfallmenge auf den eigentlichen Erodierschlamm,
- Möglichkeit der metallurgischen Verwertung bei werkstoffspezifischer Schlammerfassung.

Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigt, dass sich neben einer Verminderung des Abfallaufkommens der Einsatz eines solchen Filtersystems insbesondere beim Anschluss von zwei Drahterodiermaschinen mit 2,6 Jahren rasch amortisiert.

1 Stand der Technik

1.1 Grundlagen

Elektroerosion

Unter dem Begriff Elektroerosion werden alle Vorgänge zusammengefasst, die durch einen Materialabtrag gekennzeichnet sind, wenn in einer nicht elektrisch leitenden Flüssigkeit (Dielektrikum) elektrische Entladungen zwischen zwei Elektroden stattfinden. Mit der Elektroerosion (auch Funkenerosion genannt) können alle Werkstoffe, sofern sie elektrisch leitend sind, bearbeitet werden. Die Härte des Werkstoffes spielt dabei keine Rolle.

Der Erosionsprozess erfolgt in einem nichtleitenden Dielektrikum.

Theoretisch können alle elektrisch isolierenden Flüssigkeiten als Dielektrikum eingesetzt werden. Es werden aber nur entionisiertes Wasser (für Feinstbearbeitung) und Kohlenwasserstoffverbindungen eingesetzt. Die Kohlenwasserstoffverbindungen können entweder durch Destillation und Raffination von Mineralölen oder aber synthetisch aus Gasen im Syntheseofen unter Anwendung eines Katalysators hergestellt werden. Die synthetisch hergestellten Kohlenwasserstoffprodukte zeichnen sich durch einen nicht zu überbietenden Reinheitsgrad aus. Außerdem können genau die Kohlenwasserstoffketten zusammengebaut werden, die ein optimales Abtrags- und Verschleißverhalten ergeben. Sie sind dabei den Mineralölprodukten weit überlegen, die aus bestimmten Mineralölfraktionen durch Raffination hergestellt werden, Storr (1994).

In der Erodiertechnik unterscheidet man zwei Verfahren:

Senk- und Drahterosion

Bei beiden Verfahren wird die elektrische Energie je nach gewünschtem Ergebnis mit gesteuerten Impulsgeneratoren umgewandelt. Der Erosionsprozess erfolgt normalerweise in einer Isolierflüssigkeit (Wasser oder ölhaltige Flüssigkeit), die ständig regeneriert und filtriert wird, um Metallrückstände zu entfernen. So bleiben die äußeren Bedingungen während des ganzen Prozesses unverändert, auch wenn dieser Stunden oder Tage dauert. Die Leistungen der heutigen Anlagen sind beeindruckend: Hoher Abtrag, eine leistungsfähige Automatik, Verkettung und Speicherung sehr langer und wiederkehrender Bearbeitungszyklen sowie eine nahezu lückenlose Überwachung der endgültigen Form und Oberfläche der bearbeiteten Metalle - von spiegelglatt bis extrem rau. Dank dieser besonderen Eigenschaften gilt die Elektroerosion als eine Technologie mit großen Perspektiven für die Zukunft.

Senkerosion

Bei der Senkerosion wird die gewünschte Form mit einer dreidimensionalen Elektrode negativ im Metall abgebildet. Durch überlagerte Bewegungen in den Hauptachsen erzeugt man unterschiedlichste Formen, Einbuchtungen und Vertiefungen, wie sie zum Teil mit keinem anderen Bearbeitungssystem erreicht werden können, zum Beispiel eine spiralförmige Vertiefung oder ein viereckiges Loch in einem einzelnen Stahlblock oder die Bearbeitung eines äußerst dünnen, gehärteten Stahlbleches, das keinem mechanischen Druck ausgesetzt werden darf.

Drahterosion

Beim Drahterodierverfahren wird die gewünschte Form durch die Führung des Drahtes entlang der vorgegebenen Strecke hergestellt. Bei komplizierten Formen, die Einschnitte oder schräge, kegelförmige oder sonst unübliche Flächen erfordern, führen die obere und untere Drahtführung entsprechend unterschiedliche Bewegungen aus.

Ein Prozessschema zu den Erodierverfahren findet sich in Abb. 1.

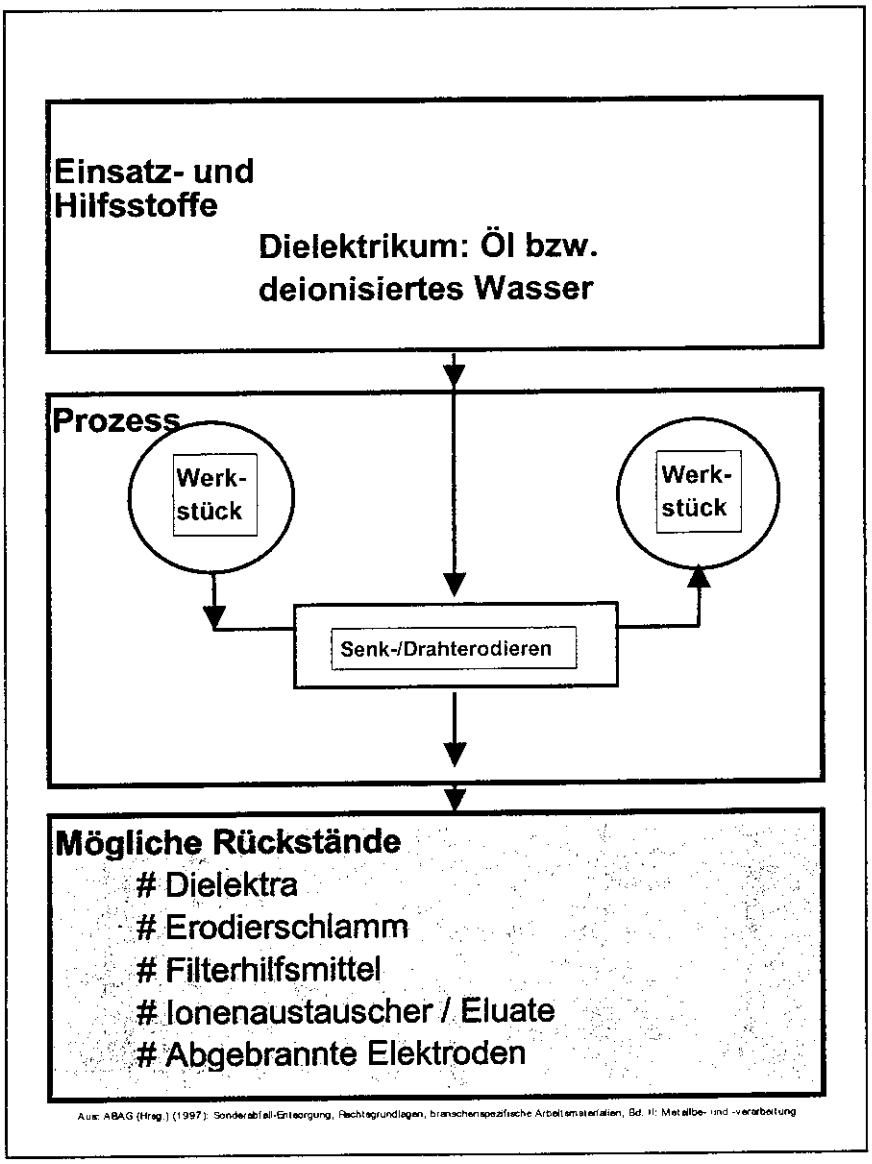

Abb. 1 Prozessschema zu den Erodierverfahren

Einen Überblick zu den relevanten Inhaltsstoffen und anfallenden Abfällen beim Senk- und Drahterodieren geben die Abb. 2 und 3.

Verfahren	Relevante Inhaltsstoffe	Abfälle
Austausch Dielektrikum	Altöl, Metall- und Elektrodenpartikel, gelöste Metalle, Produkte der Ölzersetzung	Dielektrikum
Filtration:		
Regenerierbare Filter	Metallpartikel, Öl	Filterkuchen (Erodierschlamm)
Patronenfilter	Metallpartikel, Öl	Filtermaterial (Patronenfilter mit Erodierschlamm)
Anschwemmfilter	z.B. Kieselgur, Cellulose	Filterhilfsmittel mit Erodierschlamm
Austausch der Elektroden		Elektroden (Graphit, Kupfer)
Abbeizen von Kupferelektroden	Kupfersalze und Kupferoxide	Säure
Absaugen von Nebel und Rauch	z.B. Aktivkohle / Öl	Filterhilfsmittel

Nach: ABAG (Hrg.) (1997) Sonderabfall-Entsorgung, Rechtsgrundlagen, branchenspezifische Arbeitsmaterialien, Bd. II, Metallbe- und -verarbeitung, Fellbach

Abb. 2: Abfälle beim Senkerodieren

Verfahren	Relevante Inhaltsstoffe	Abfälle
Austausch Dielektrikum	Wasser, Mineralsalze	Dielektrikum
Aufbereitung Dielektrikum	Metallkationen, Anionen	Ionenaustauscher (Kationen-, Anionenaustauscher bzw. Mischbettionenaustauscher)
Filtration:		
Regenerierbare Filter z.B. Sand-, Kiesbettfilter	Metallpartikel	Filterkuchen (Erodierschlamm)
Patronenfilter	Metallpartikel	Filtermaterial (Patronenfilter mit Erodierschlamm)

Nach: ABAG (Hrg.) (1997) Sonderabfall-Entsorgung, Rechtsgrundlagen, branchenspezifische Arbeitsmaterialien, Bd. II, Metallbe- und -verarbeitung, Fellbach

Abb. 3: Abfälle beim Drahterodieren

1.2 Anforderungen an das Wasser

Normen und Richtlinien zur Definition der Wasserqualität bei der Drahterosion liegen nicht vor.

Die angegebenen Werte zu den gelösten und ungelösten Inhaltsstoffen beruhen auf Erfahrungen, die sich aus dem Anlagenbetrieb ergaben, oder sind im Rahmen dieses ABAG-Vorhabens gemessen worden.

Folgende Parameter spielen eine Rolle, s. a. Kap. 3.1, 3.3:

GELÖSTE INHALTSSTOFFE:

*** Leitfähigkeit als Summenparameter zur Erfassung im Wasser gelöster Inhaltsstoffe,**
DIN EN 27888 (1993-11) DEV C 8
Zum Vergleich:

Reines Wasser, Eigendissoziation, 25 °C	0,0584	µS/cm
Bodenseewasser (aufbereitet)	329,0	µS/cm
Wasser Landeswasserversorgung (aufbereitet)	502,0	µS/cm
Anforderungen bei Drahterosion:	**10,0 bis 1,0**	**µS/cm**

*** NO_3^-, NO_2^-, NH_4^+, PO_4^{3-}**
Zum Vergleich:

Bodenseewasser (aufbereitet)	NO_3^-	≈ 4,6	mg/l
	NO_2^-	< 0,005	mg/l
	NH_4^+	< 0,01	mg/l
	PO_4^{3-}	< 0,077	mg/l

Anforderungen bei Drahterosion: NO_3^-, NO_2^-, NH_4^+, PO_4^{3-} < 1 mg/l

*** DOC Dissolved Organic Carbon,** DIN EN 1484 (1997-08) DEV H 3
Zum Vergleich:

Bodenseewasser (aufbereitet)	DOC	1,1	mg/l Kohlenstoff

Anforderungen bei Drahterosion: Nicht festgelegt

UNGELÖSTE INHALTSSTOFFE:

*** Trübung**, DIN EN 27027 (1994-03) (seit 2000 DIN EN ISO 7027 (2000-04) DEV C 2)
Trübung ist die Verringerung der Durchsichtigkeit einer Flüssigkeit, verursacht durch die Gegenwart ungelöster Substanzen, angegeben in FAU (Formazine Attenuation Units; Formazin-Schwächungseinheiten):
Anforderungen bei Drahterosion: Kleiner 10 bis 15 FAU

*** Partikelverteilung**
Ermittlung der Partikelgrößen z.B. mit einem Quantimet 500, Leica. (Roth u. Pinnow, 1981).
Anforderungen bei Drahterosion: Partikelgröße möglichst < 4 µm,
zur Vermeidung von Störungen am Draht.

*** Abfiltrierbare Stoffe**, DIN 38409, Tl. 2 (1987-03) DEV H 2
Anforderungen bei Drahterosion: Nicht festgelegt

1.3 Entnahme gelöster und ungelöster Stoffe

1.3.1 Gelöste Stoffe

Für die Einstellung optimaler Bedingungen beim Drahterodieren ist die Leitfähigkeit des Reinwassers als Summenparameter für die im Wasser gelösten Stoffe in Form von Ionen von großer Bedeutung.

Bei zu hoher Leitfähigkeit findet zwischen dem stromführenden Erodierdraht und dem zu bearbeitenden Werkstück eine Elektrolyse statt. Sie bewirkt einen ungewollten Materialfluss vom unedleren zum edleren Werkstoff.

Es gilt deshalb, einen möglichst niedrigen Leitwert des Wassers aufrecht zu erhalten. Dies geschieht in der Regel mit Hilfe eines Ionenaustauschers (Deionisierpatrone). Ein Schema einer solchen Aufbereitungsanlage findet sich in Abb. 4.

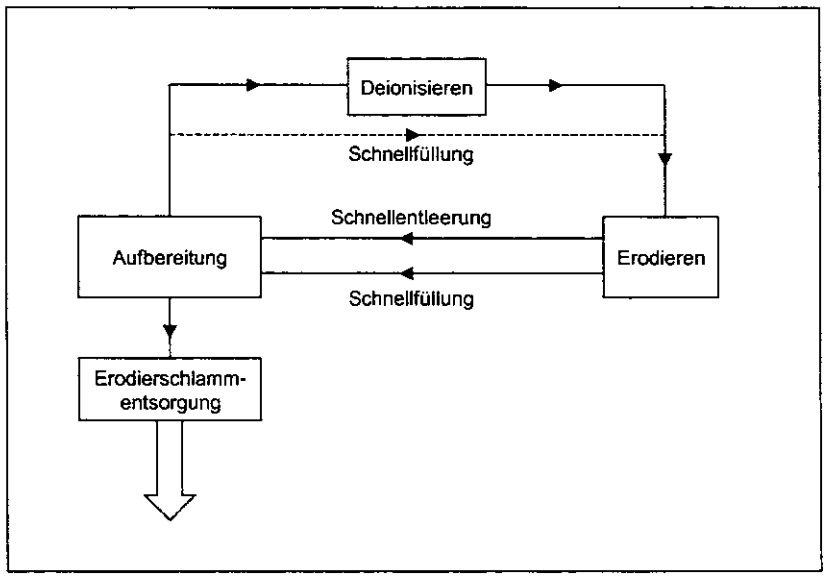

Abb. 4: Schema einer Aufbereitungsanlage (Zimmermann, 1994)

Mit einer Leitwertsonde wird permanent die Leitfähigkeit des Reinwassers gemessen. Bei Überschreitung des vorgegebenen Grenzwertes wird zur Korrektur das Wasser über eine Deionisierpatrone geleitet. In der Praxis wird meist mit einem Leitwert von 10 μS/cm gearbeitet. Dieser Wert kann je nach Maschinentyp und Anwendung unterschiedlich sein und bei hohen Anforderungen auf einen Wert bis zu 1 μS/cm sinken. Zur Entfernung der gelösten Stoffe werden Mischbettionenaustauscher eingesetzt, die nach Gebrauch regeneriert werden und so dazu beitragen, das Abfallaufkommen erheblich zu vermindern (ABAG: Projekt Nr. 147, 1998). Zusätzlich kann der Einsatz einer Umkehrosmoseanlage zu einer Standzeitverlängerung des Deionisierungsharzes bis zu einem Faktor 10 führen.

1.3.2 Ungelöste Stoffe

1.3.2.1 Charakterisierung der ungelösten Stoffe über die Partikelverteilung

Die Bestimmung der Partikelverteilung im aufzubereitenden Wasser führt zu Basisdaten, die die Wahl des einzusetzenden Eliminations-Verfahrens erleichtern. Für einen Schlamm aus einer Sodick Draht-Erodier-Maschine (Bearbeitung von Stahl) wurde von uns eine Partikelanalyse vorgenommen, nach einem Verfahren von Roth u. Pinnow (1981), s. Abb. 5.

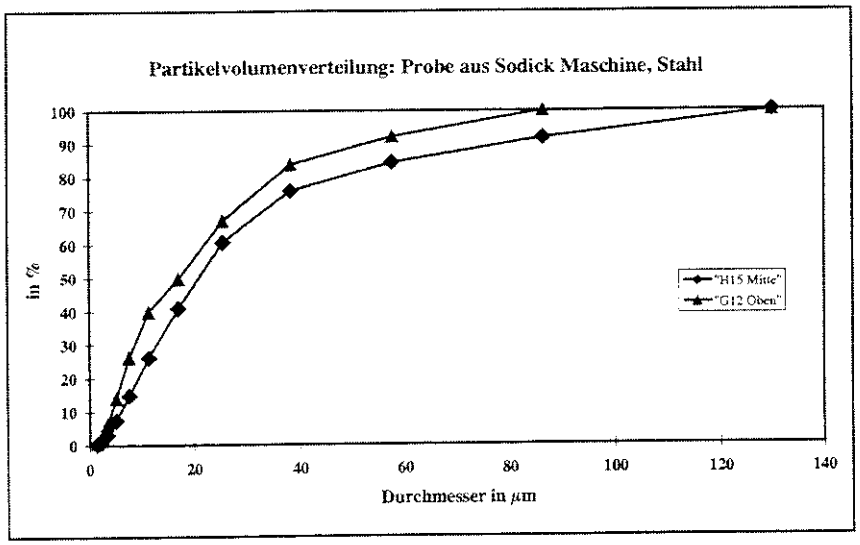

Abb. 5: Summenhäufigkeit der Partikelvolumenverteilung bei einem Erodierschlamm (Stahl)

Die REM-Aufnahme in Abb. 6 (entspricht nicht der Verteilung in Abb. 5) zeigt bemerkenswert schön die Kugelstruktur der abgetragenen Partikel.

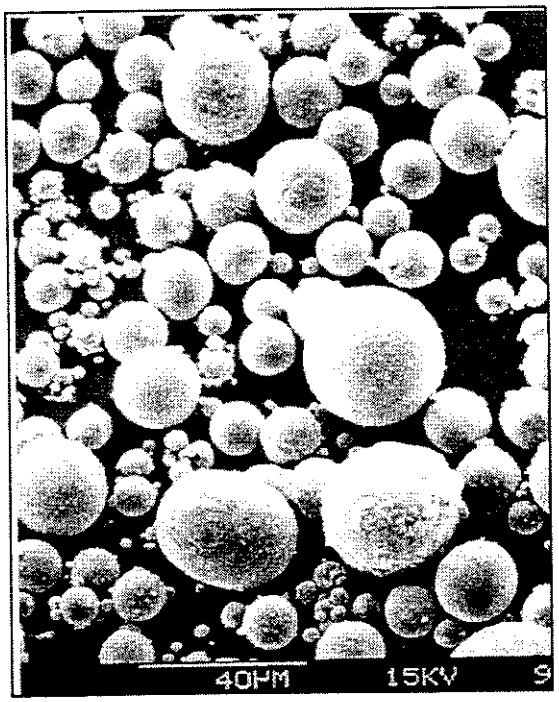

Abb. 6: REM-Aufnahme beim Erodieren entstehender kugelförmiger Partikel, Maßstab: 40 µm, s. Bildrand unten (Oel-Held, Erosions-Kolleg, Stuttgart)

1.3.2.2 Sedimentation

Der Sedimentationsprozess ist eine mögliche Verfahrensstufe zur Partikelentfernung und wird aus diesem Grunde hier näher betrachtet. Außerdem sind die nachfolgenden Ausführungen von erheblicher Bedeutung für das Verständnis der Regeneration von Raumfiltern.

Die Berechnung der Sedimentationsgeschwindigkeit einer Einzelkugel als Funktion der Partikelgröße gibt einen Einblick in das Sedimentationsgeschehen (Zogg, 1993). Bei höheren Konzentrationen sind die soge-

nannten "Schwarmgeschwindigkeiten" zu ermitteln. Mit den Kennzahlen Re und Ar ist die stationäre Sinkgeschwindigkeit zu bestimmen:

Reynoldszahl Re:

Re ergibt sich aus dem Verhältnis der Trägheits- zur Reibungskraft. Als wichtigste dimensionslose Kennzahl der Fluiddynamik dient sie zur Charakterisierung und Beschreibung der Strömungsart (laminar, turbulent) von reibungsbehafteten Flüssigkeiten (Wetzler, 1985).

$$Re_p = \rho_F \, v_P \, d_p / \eta_F \qquad (1)$$

$$\eta_F = v_F \, \rho_F \qquad (2)$$

$$Re_p = v_P \, d_p / v_F \qquad (3)$$

Archimedeszahl Ar:

Ar gibt das Verhältnis der hydrostatischen Auftriebskraft zur Trägheitskraft. Diese Kennzahl findet Anwendung im Zusammenhang mit Absetzvorgängen u.a. in Zentrifugen, Zyklonen und Wirbelschichten. (Wetzler, 1985, Zogg, 1993):

$$Ar_p = g \, d_p^3 \, (\rho_P - \rho_F) \, \rho_F / \eta_F^2 \qquad (4)$$

Stationärer Absetzvorgang:

Laminare Umströmung $Re_p \leq 0{,}2$; $Ar_p \leq 3{,}6$; Stokessches Gesetz:

$$v_P = (\rho_P - \rho_F) \, g \, d_p^2 / (18 \, \eta_F) \qquad (5)$$

Übergangsbereich $0{,}2 \leq Re_p \leq 2 \cdot 10^5$; $3{,}6 \leq Ar_p \leq 1 \cdot 10^{10}$

$$v_P = \eta_F \, Re_{po} / (\rho_F \, d_p) \qquad (6)$$

mit

$$Re_{po} = 18 \, (\sqrt{1 + \sqrt{Ar}/9} - 1)^2 \qquad (7)$$

(Symbole und Bezeichnungen, s. Kap. 8)

Ergebnisse für die Sedimentationsgeschwindigkeiten v_P verschiedener Materialien und Partikeldurchmesser d_P sind, mit den o.g. Gleichungen berechnet, in Abb. 7 zusammengestellt.

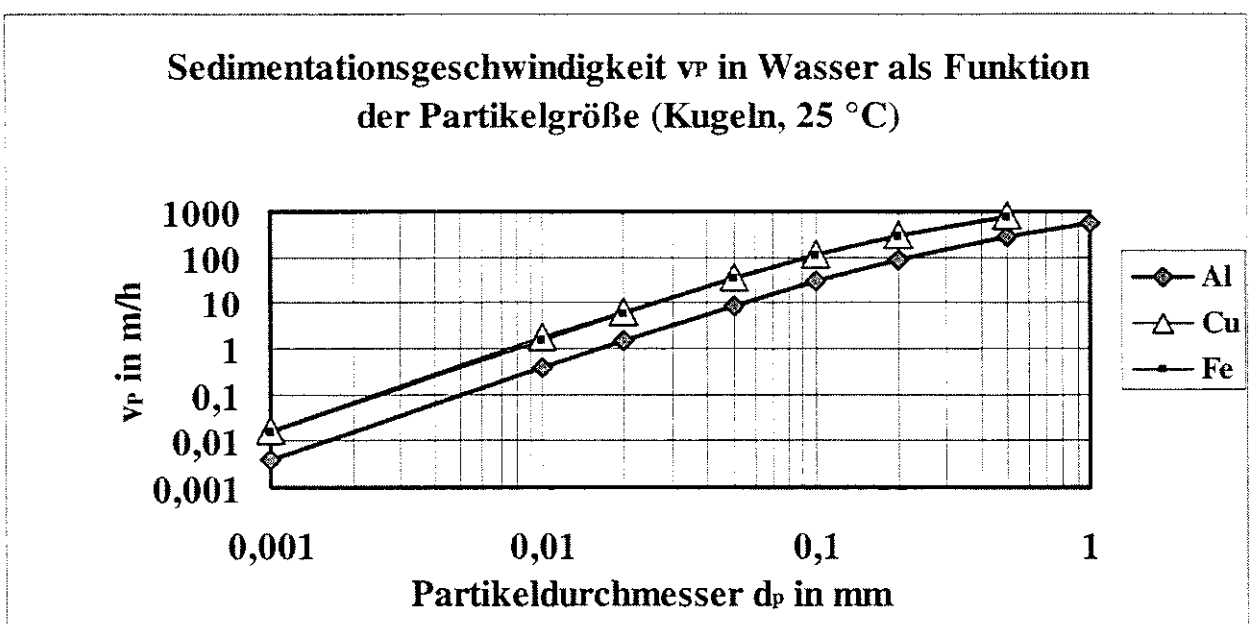

Abb. 7: Sedimentationsgeschwindigkeit v_P eines Einzelkorns (Kugel) als Funktion des Partikeldurchmessers d_p (Material-Dichten Al: 2,7 g/cm³, Fe: 7,9 g/cm³, Cu: 8,9 g/cm³)

In Abb. 8 sind analog die Sedimentationszeiten t_P für eine Sinkstrecke L = 0,1 m dargestellt. Eine Verlängerung der Absetzzeit durch die instationäre Sinkphase zu Beginn wurde dabei vernachlässigt.

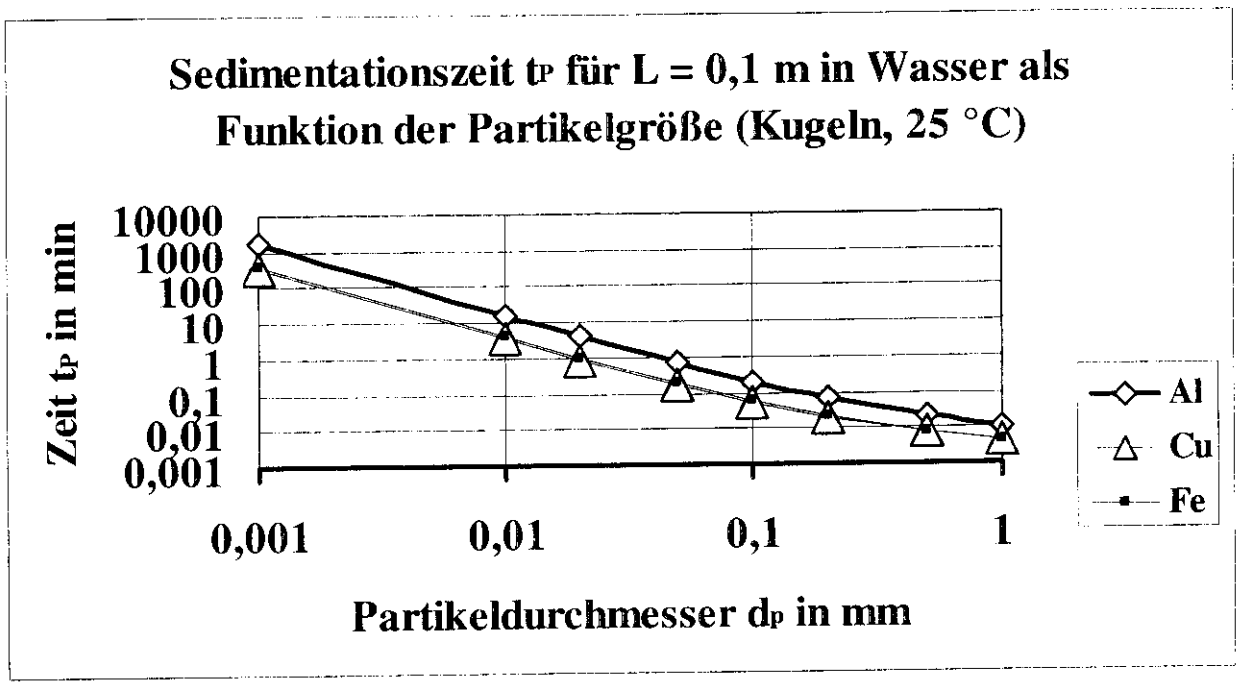

Abb. 8: Sedimentationszeit t_P eines Einzelkornes (Kugel) als Funktion des Partikeldurchmessers d_p für eine Höhe L = 0,1 m (Material Al, Cu, Fe)

Als Apparate zur Durchführung der Erosionsschlammabscheidung über Sedimentation dienen vorrangig Lamellenabscheider.

1.3.2.3 Filtration

1.3.2.3.1 Einleitung

Die Filtration ist eine verfahrenstechnische Grundoperation zur mechanischen Stofftrennung von grob- bis feinstdispersen festen und flüssigen Bestandteilen aus Flüssigkeiten und Gasen mit porösen teildurchlässigen Filtermitteln, die in einem Filterapparat untergebracht sind. Nach dem Abscheidevorgang bei der Abtrennung von Feststoffen aus Flüssigkeiten und Gasen unterscheidet man zwischen Oberflächenfiltration und Tiefenfiltration. Bei der Oberflächenfiltration werden die Teilchen durch Siebwirkung vorwiegend auf dem Filtermittel, bei Tiefenfiltration vorwiegend im Inneren desselben abgelagert (Osterroth, 1979).
Ein Beispiel zu Filtermedien und Porengröße und damit verbundener Filteroperation gibt Abb. 9.

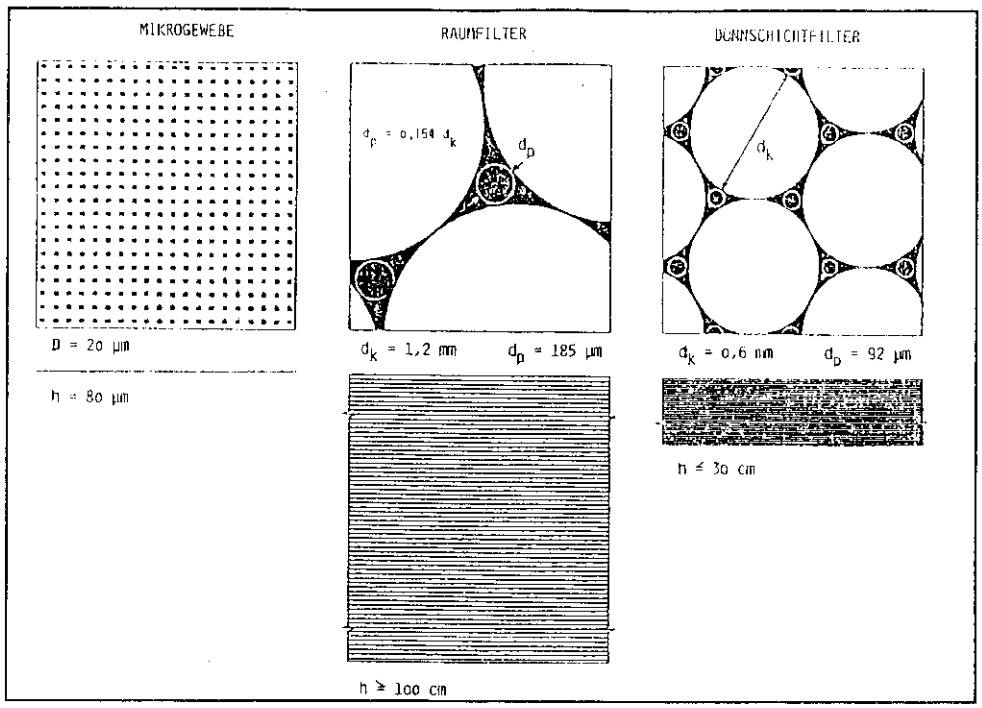

Abb. 9: Schematische Darstellung von Porengrößen und Filtermedien (Roth, 1983)

1.3.2.3.2 Siebe, Filterpatronen

Eingesetzt werden Filterpatronen mit Papier oder Metallgewebe als Filtermittel, s. Abb. 10 und 11, die Trenngrenzen bis 3 μm ermöglichen.

Bei den Filterpatronen mit einer Faserpackfüllung oder einem sterngefalteten Papierelement ist eine Standzeit von ca. 100 -300 h je nach Bearbeitungsmodus der Maschine zu erwarten. Nachteilig sind die Kosten der Filterpatronen und deren Beseitigung als Sondermüll.

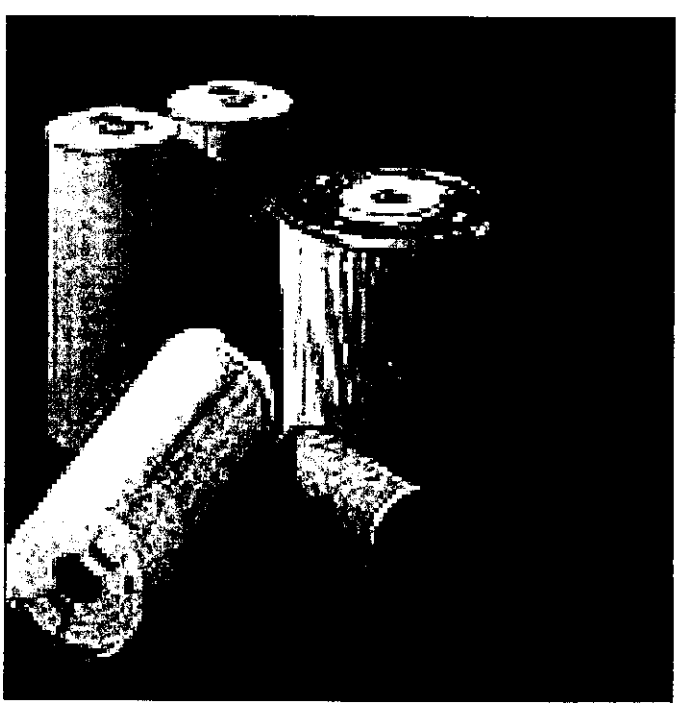

Abb. 10: Filterpatronen, Papier als Filtermittel (Mann+Hummel, Ludwigsburg)

Abb. 11: Filterpatronen, Metallgewebe als Filtermittel (GKD-Gebr. Kufferath GmbH & Co. KG, Düren)

Eigene Versuche zur Regeneration von Filterpatronen mit Metallgewebe, die bei Erreichen eines vorgegebenen Grenzdruckverlustes außer Betrieb genommen werden müssen, führten zu folgenden Ergebnissen, s. Tab. 1.

Tab. 1: Versuche zur Reinigung / Regeneration von Filterpatronen mit Metallgewebe

Methode	**Ergebnis**
Reinigung in H_2O_2-Lösung	Erfolglos
Ultraschallbad	Erfolglos
Bad in EDTA-Lösung EDTA: Ethylendiamintetraessigsäure reagiert mit vielen Metallionen unter Bildung nicht ionisierter Chelate; wird genutzt um störende Metallsalzablagerungen aufzulösen (Maskierung)	Erfolgreich, doch damit verbunden wäre eine Verlagerung des Entsorgungsproblems ins Wasser

1.3.2.3.3 Raumfiltration

Bei der Raum- oder Tiefenfiltration treten folgende Effekte auf, s. Abb. 12:

Partikel werden angelagert und zurückgehalten:

- Aufgrund von Trägheitseffekten 1,
- Aufgrund von sterischer Behinderung 2,
- Aufgrund von Sedimentation 3,
- Aufgrund Brownscher Molekularbewegung 4,
- Auch ein sog. hydrodynamischer Anlagerungsmechanismus ist denkbar.

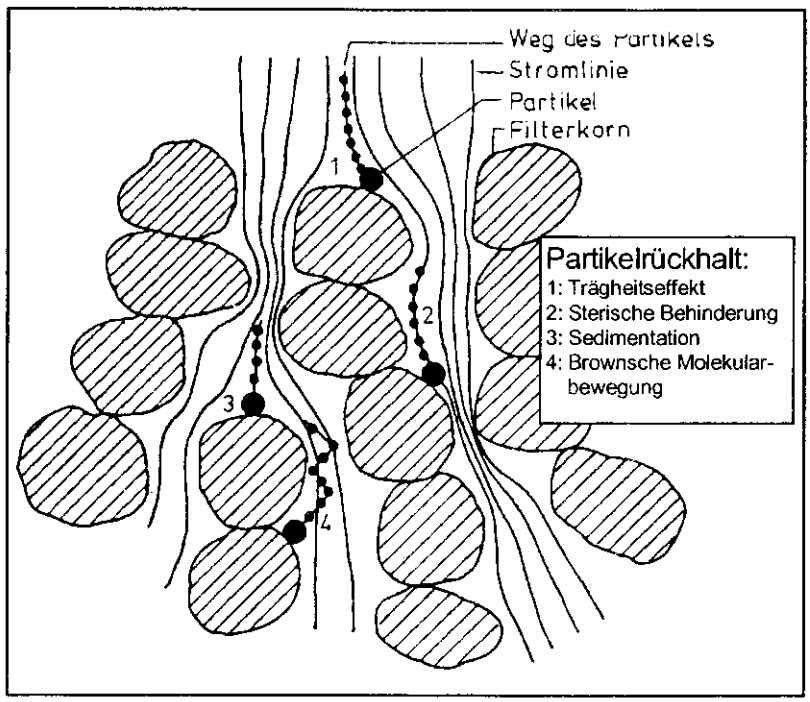

Abb. 12: Prinzip der Filtration (Hahn, 1987)

Der Filtereffekt wird ganz wesentlich beeinflusst durch die repräsentative Partikelgröße d_p des zu filtrierenden Feststoffes, die Korngröße des Filtermediums, die dynamische Zähigkeit der Flüssigkeit η_F und die Filtergeschwindigkeit v_F (≡ Volumenstrom bezogen auf Filterquerschnitt in (m³/h)/ m²) (Ives, 1973). Die Filterwirkung als Funktion der Partikelgröße d_p wird aus Abb. 13 ersichtlich (Yao et al., 1971). Dabei sind:
d_m = 0,4 mm (Glaskugeln) Korngröße des Filtermittels, ε = 0,36 Porosität, T = 23 °C, Betthöhe z_0 = 0,14 m, Filtergeschwindigkeit v_F = 4,8 m/h.
Es fällt auf, dass die Filterwirkung der Raumfiltration für Partikel im Größenbereich von 1 μm ein Minimum aufweist. Nach dem theoretischen Modell haben Raumfilter in diesem Trennbereich keine optimale Wirkung .

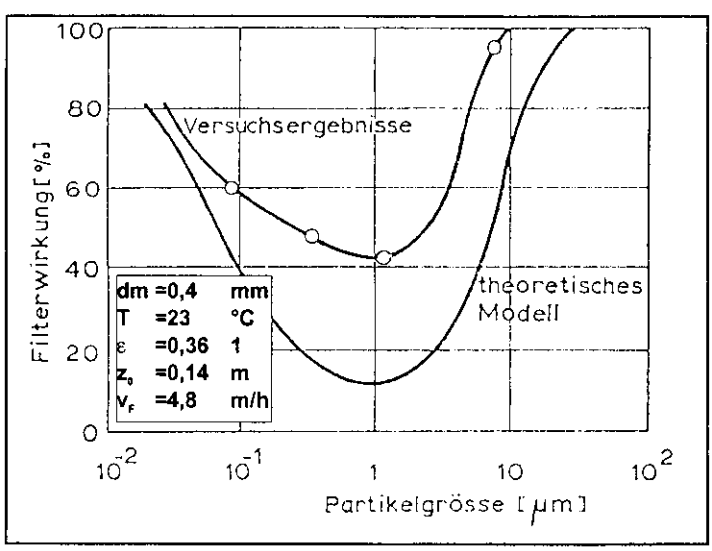

Abb. 13: Filterwirkung als Funktion der Partikelgröße (Yao et al., 1971)

Der Filtrationsvorgang führt zu einer Porenraumbelegung. Damit einher geht die Verringerung der Porosität die zu einer Druckverlustzunahme Δp führt. Das theoretische Widerstandsgesetz für das Durchströmen von Füllkörperschüttungen lautet (Brauer, 1971):

$$\frac{\Delta p}{z} = \psi \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_F v_F^2}{d_m} \qquad (8)$$

Aufgelöst nach dem Widerstandsbeiwert ψ folgt:

$$\psi = \frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon} \cdot \frac{\Delta p}{\rho_F v_F^2} \cdot \frac{d_m}{z} \qquad (9)$$

(Symbole und Bezeichnungen, s. Kap. 8)

Je nach Partikelstruktur und Zusammensetzung ist ein unterschiedliches Druckverlustverhalten zu erwarten. Konzentriert sich der Druckverlust in einer Filterschüttung (z.B. im Abstromfilter) in den oberen Schichten, dann spricht man von einer Flächen- oder Kuchenfiltration. Im Gegensatz dazu steht die Raumfiltration, bei der idealerweise das ganze Bett am komplexen Filtrationsgeschehen teilnimmt.

1.3.2.3.4 Filterkonstruktion, Filterbetrieb

Das Schema eines Druckfilters, der üblicherweise bei der Aufbereitung von Industriewasser eingesetzt wird, zeigt Abb. 14.

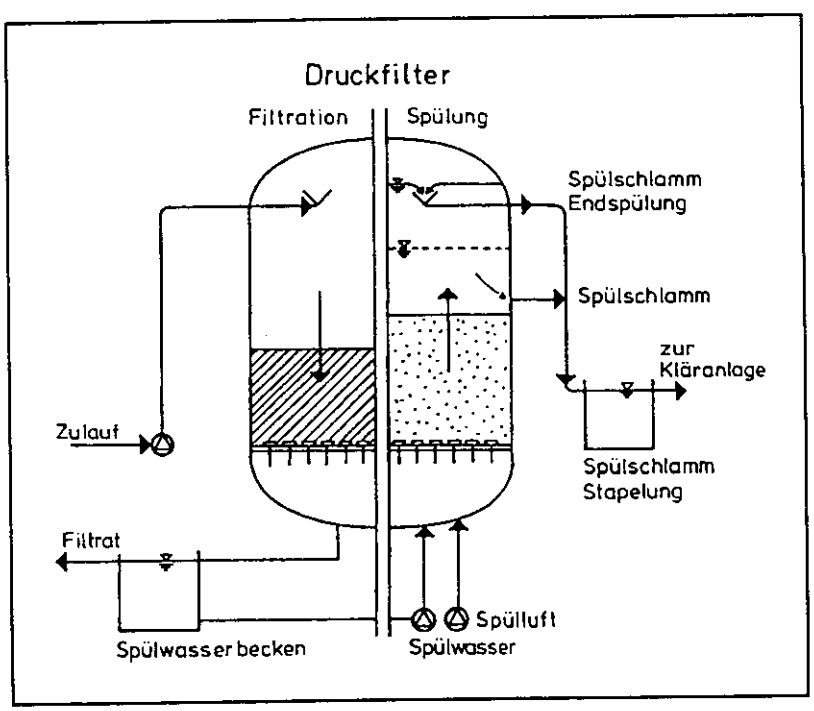

Abb. 14: Schema eines Druckfilters (Hahn, 1987)

Beim Betrieb eines Filters werden zwei Betriebszyklen unterschieden, die Filtration und die Regeneration. Letztere muss dann erfolgen, wenn über die Filterlaufzeit hinweg entweder der Druckverlust so groß wird, dass der gewünschte Durchsatz nicht mehr zu halten ist, oder ein "Durchbruch" auftritt. Beides führt dazu, dass die gewünschte Qualität des Filtrates nicht mehr gewährleistet werden kann.

Die Regeneration oder Rückspülung besteht darin, das Festbett durch ausreichende Anströmgeschwindigkeit im Aufwärtsstrom zu fluidisieren bzw. zu expandieren, um so die in den Porenräumen abgelagerten Feststoffe aus dem Bett zu entfernen. Um den Reinigungseffekt zu verbessern, kann zusätzlich eine Luft- oder eine kombinierte Wasser-Luft Rückspülung erfolgen. Dabei ist darauf zu achten, Verluste an Füllkörpermaterial weitestgehend zu vermeiden.

Das Geschehen bei der Fluidisation eines Festbettes ist in Abb. 15 schematisch zusammengestellt:

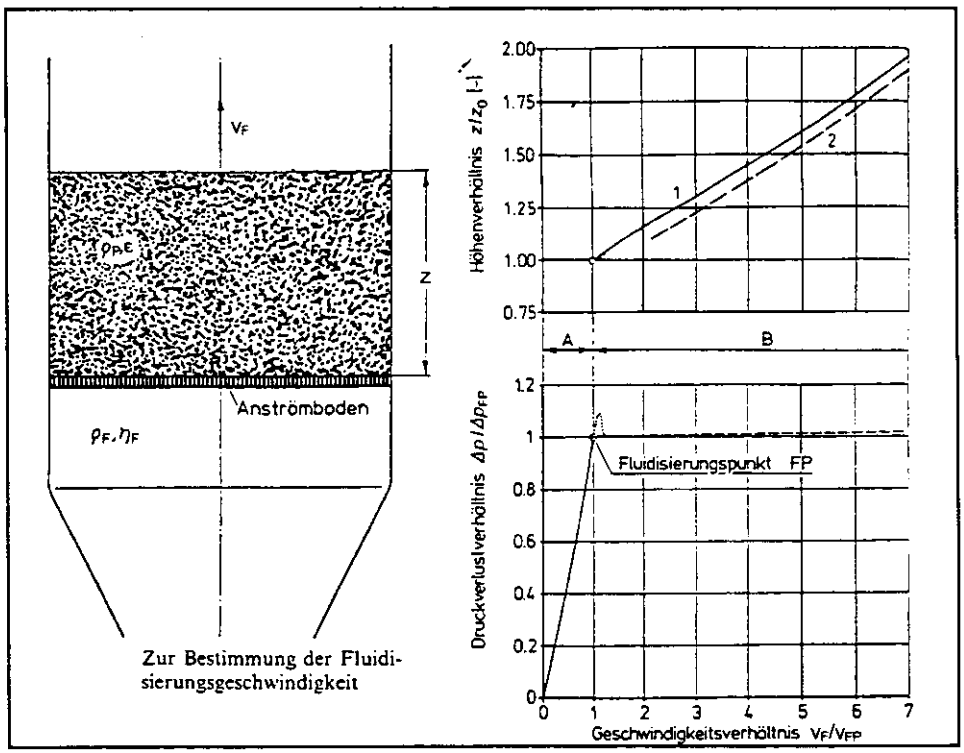

Abb. 15: Fluidisation eines aufwärts durchströmten Filterbettes (Zogg, 1993)

Der Fluidisierungspunkt FP in einem aufwärts durchströmten Festbett ist dann erreicht, wenn die auf die Schüttung wirkende Druckkraft der um den Auftrieb verminderten Gewichtskraft der Füllkörperschüttung entspricht. Daraus ist der Druckverlust am Fluidisierungspunkt zu ermitteln (Zogg, 1993):

$$\Delta p_{FP} = z\ (1 - \varepsilon)\ (\rho_m - \rho_F)\ g \qquad (10)$$

Die Fluidisierungsgeschwindigkeit v_{FP} lässt sich mit Gl. 11 berechnen zu:

$$\frac{1{,}75\ \rho_F}{\varepsilon^3\ d_m}\ v_{FP}^2 + \frac{150\ (1-\varepsilon)\ \eta_F}{\varepsilon^3\ d_m^2}\ v_{FP} - (\rho_m - \rho_F)\ g = 0 \qquad (11)$$

(Symbole und Bezeichnungen, s. Kap. 8)

Eine optimale Wasser-Rückspülung ist bei einer Expansion des Filterbettes um ca. 50 % bzw. einer Filterbettporosität von $\varepsilon = 0{,}6$ bis 0,7 zu erwarten (Meyer, 1979).

Ein Beispiel für die Berechnung des Fluidisierungspunktes FP und für die Anströmgeschwindigkeit zum Erreichen einer Bettexpansion von 50 % ist in Tab. 2 gegeben.

Tab. 2: Fluidisierungspunkt FP eines Sandbettes

Parameter		**Wert**
Temperatur T	in °C	20
Porosität des Bettes ε	1	0,40
Sanddichte ρ_m in kg/l		2,650
Mittl. Korndurchmesser d_m	in mm	0,86
Betthöhe z_0 in m		0,25
Fluidisierungspunkt FP bei v_{FP}	in m/h in m/s	26,85 0,0075
Druckverlust bei Erreichen des Fluidisierungs-Punktes FP Δp_{FP}	in Pa in m WS	2430 0,243
Wasser-Rückspülgeschwindigkeit zur Expansion der Filterschicht um 50 % v_{Rmax}	in m/h in m/s	93,6 0,0260

Zur Erzielung einer gleichmäßigen Fluidisierung ist der Konstruktion und Ausgestaltung des Filterbodens besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Der Druckverlust sollte 10 bis 20 % des Verlusts im fluidisierten Bett betragen (Zogg, 1993). Für die Rückspülung ist die richtige Auslegung und zweckmäßige Gestaltung des Bodens von großer Bedeutung. Nur bei sicherer Regeneration des Filterbettes ist die langfristige Funktionstüchtigkeit des Filters gewährleistet. Filterdüsen haben sich für die konstruktive Gestaltung des Anströmbodens sehr gut bewährt, als Bsp. s. Abb. 16.

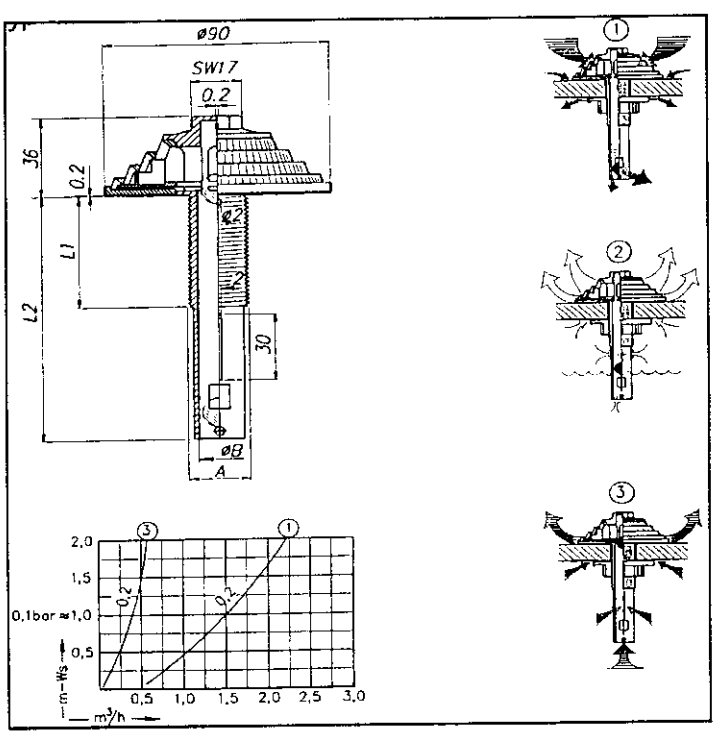

Abb. 16: Filterdüse für Anströmboden (Wasser-Luft- Rückspülung möglich) (KSH GmbH, Herford)

1.3.2.3.5 Mikrofiltration

Die Mikrofiltration als Oberflächenfiltration erlaubt, Partikel im Bereich von 10 bis 0,1 μm zu entfernen. Dabei werden z. T. Querstromapparate mit und ohne bewegte Wände eingesetzt. Verstärkt finden sich auch Rohrmodulsysteme mit mikroporösen Membranen auf dem Markt. Ein periodisches Reinigen durch Rückspülen ist erforderlich. Eine Tiefenfiltration in die Membrane hinein ist unbedingt zu vermeiden.

Die Firma AGIE (Schorndorf) bot ein Filtersystem "AGIECOLOGY C" an, das mit einer Membran ausgestattet war. Betriebsergebnisse lagen während der Projektlaufzeit nicht vor. Eine Anfrage bei der Firma im Nov. 2000 ergab, dass dieses Filtersystem nicht mehr verkauft wird.
Dies heißt nicht, dass diese Technologie sich nicht bewährt hätte. Sonst könnte sich die Firma Fabimex (Losone, CH) nicht erfolgreich auf dem Markt behaupten. Sie bietet seit etwa 5 a ein automatisch rückspülbares Membranfiltersystem an. Eine Partikelentnahme bis 4 μm wird bei einem Permeatstrom bis 2 m³/h erreicht, s. Abb. 17.

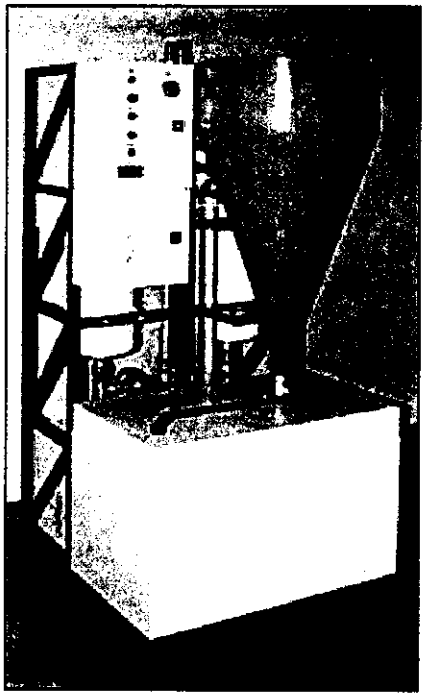

Abb. 17: Ansicht Filtersystem ECONE (Fabimex, SA, Losone, CH)

Ebenfalls bemerkenswert ist ein rückspülbarer keramischer Oberflächenfilter der Firma Kerafol. Bei einer Porengröße von 2 μm und einer Membranfläche bis 3,6 m² lassen sich medienabhängige Permeatströme bis 6 m³/h erreichen, s. Abb. 18.

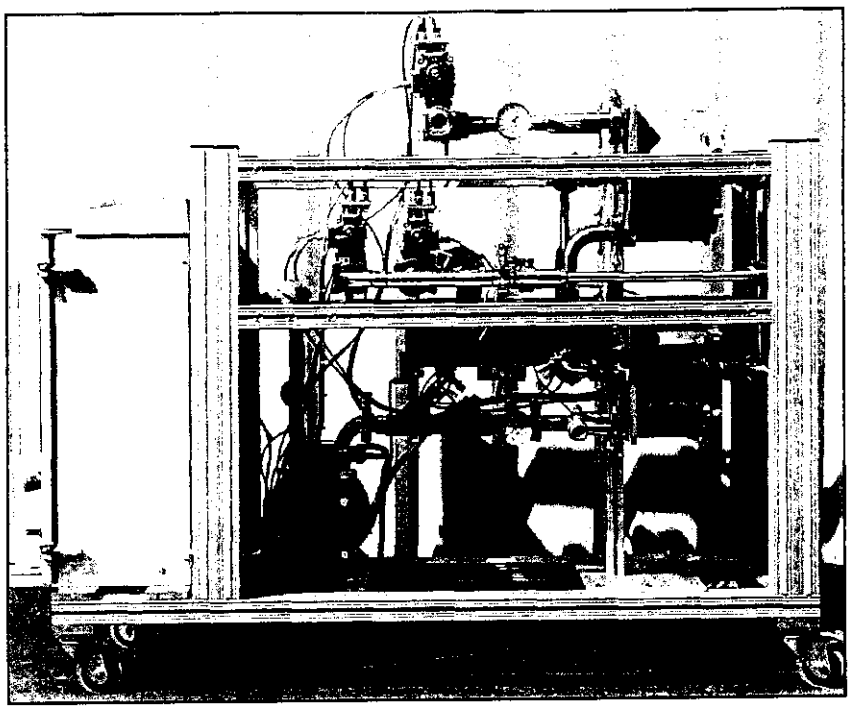

Abb. 18: Ansicht Filtersystem KERAFIL ECO DE (Kerafol, Eschenbach)

2 Beschreibung des Projektes

2.1 Erwartete Weiterentwicklung

Wie in Kap. 1.3.2.3 ausgeführt, kann eine Entnahme ungelöster Stoffe aus wässrigen Suspensionen mit Verfahren der Sandfiltration erfolgen.

Das von AWR eingesetzte Filtersystem trennt die Schmutz- und Schlammpartikel vom Wasser und erlaubt dem Anwender nach Austrocknen des Metallschlamms, diesen einer "metallurgischen Verwertung" zuzuführen, so dass kein Sonderabfall beseitigt werden muss.

Kern des Reinigungssystems ist ein mit Quarzsand befüllter Reaktor als Filter. Er wird mit einer Pumpe im Abstrom beaufschlagt. Die Schmutzpartikel werden zurückgehalten und das gereinigte Wasser ins Wasserbad der Maschine zurückgeführt.

Die im Filter zurückgehaltenen Metallpartikel führen durch Verringerung des Porenvolumens zu einer Zunahme des Druckverlustes, verbunden mit einer Durchsatzminderung. Aus diesem Grund muss der Filter in regelmäßigen Intervallen rückgespült werden. Der Filtrationsvorgang wird hierzu unterbrochen. Aus einem separaten Tank (Rückspültank) wird Wasser im Aufstrom durch den Quarzsandfilter geführt, verbunden mit einer Fluidisierung und Reinigung des Filterbetts.

Bemerkenswert ist die Konzeption, den bei diesem Prozess erhaltenen Metallschlamm in wasserdurchlässige Kunststoffsäcke zu verbringen, die Reststoffe nach dem Austropfen zu entnehmen und einer geeigneten Verwertung zuzuführen.

Zur Verbesserung des Absetzverhaltens werden geringe Mengen eines Flockungshilfsmittels zugegeben.

Die gesamten Verfahrensabläufe wie Filterlaufzeit, Dauer der Rückspülung, etc. lassen sich frei programmieren und sind somit jederzeit vom Anwender veränderbar. Damit lässt sich der Betrieb der Filteranlage sehr gut an betriebliche Gegebenheiten anpassen.

2.2 Optimierung der Anlage in Vorversuchen

Die ursprüngliche sternförmige Verteilerkonstruktion in der Filtereinheit für die Rückspülung war für eine befriedigende Regeneration des Bettes nicht ausreichend und gab keine Gewähr für eine "gleichmäßige" Anströmung und befriedigende Fluidisierung des Filterkörpers.

Die mit der ersten eingesetzten Pumpe zu erzielende Rückspülgeschwindigkeit war (auf Grund von Berechnungen) als nicht ausreichend zu beurteilen. Eine Fluidisierung des Bettes und damit ein zufriedenstellender Spüleffekt war bei diesen konstruktiven Vorgaben nicht zu erreichen.

Die Verfahrensoptimierung konzentrierte sich auf die konstruktive Gestaltung der Filtereinheit. Insbesondere musste die Bodenkonstruktion durch Einsatz entsprechender Filterkerzen, s. Abb. 16, so gestaltet werden, dass eine Wasser-Luft Rückspülung möglich wurde.

Die Konzeption der Anlage (Filterbetrieb) ist schematisch in Abb. 19 dargestellt. Die Abmessungen der wesentlichen Elemente der Anlagen finden sich in Tab. 3.

Tab. 3: Angaben zum Filtersystem

Parameter		Wert
Filterabmessungen:		
Durchmesser	in m	0,60
Filterfläche	in m²	0,283
Schütthöhe Sandschicht	in m	0,39
Höhe		
Drei Sandkornschichten, Höhe	in m	0,40
Körnungen		
Körnung	in mm	0,5 - 2,0
(Quarzsand ρ = 2,65 g/cm³)		
Durchsatz		
Volumenstrom	in m³/h	7,9 - 8,2
Filtergeschwindigkeit	in m/h	28 - 29
Rückspülung, Zeit	in min	3
Betriebsweise		
Betrieb: abwärts durchströmt		
Rückspülung: aufwärts durchströmt		
Absetzbecken		
Kegelstumpfform, Wasservolumen	in m³	0,33

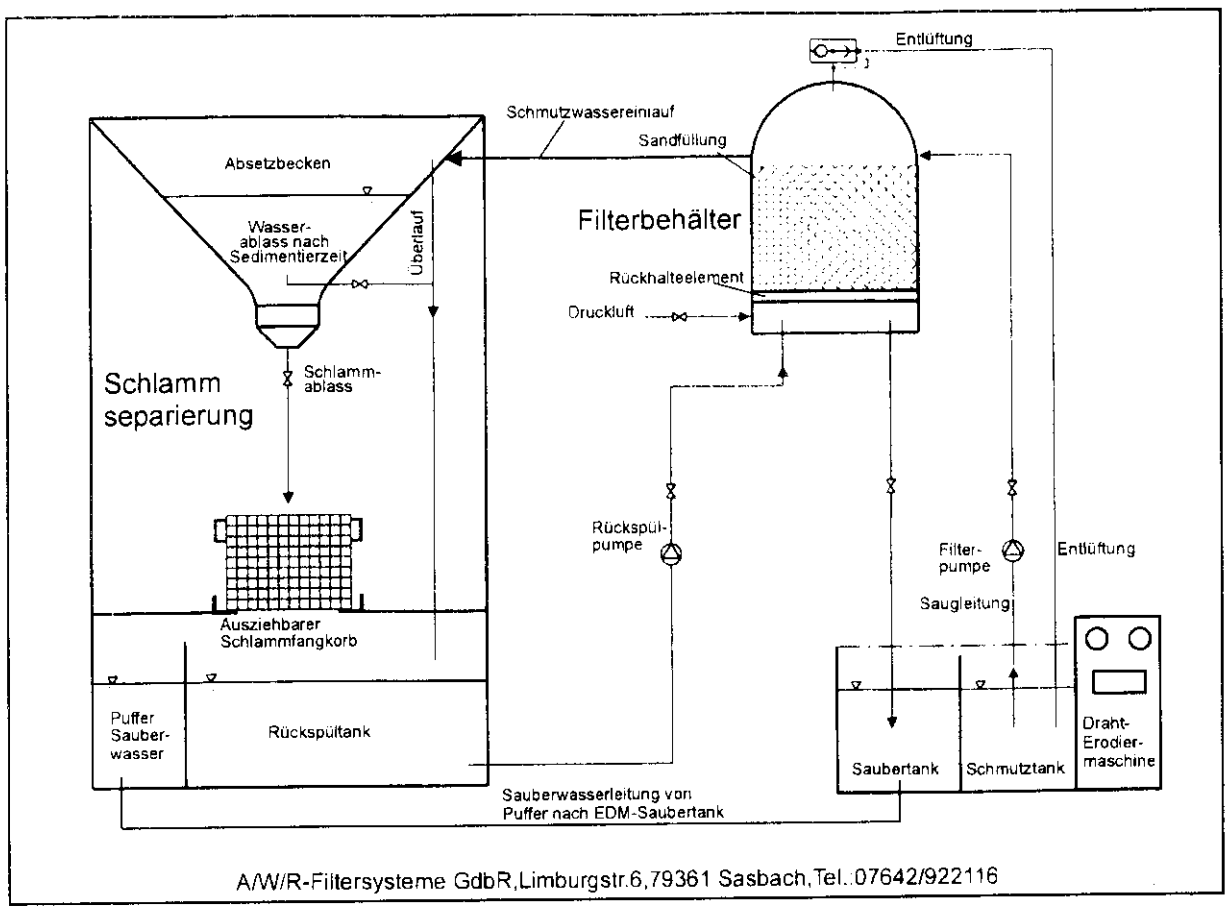

Abb. 19: Prozessführung der AWR-Filteranlage (vereinfacht)

3 Untersuchungen vor Ort

3.1 Methoden

Nachfolgend finden sich zu den 1996 eingesetzten Analysenmethoden nähere Angaben, soweit erforderlich werden die jetzt gültigen Normen angegeben (2001):

Abfiltrierbare Stoffe, DIN 38409, Tl. 2 (1987-03) DEV H 2:
Definition: Die volumenbezogene Masse der im Wasser enthaltenen ungelösten Stoffe, die unter bestimmten Bedingungen abfiltriert und im Anschluss an ein festgelegtes Trocknungsverfahren ausgewogen werden.
Abfiltrierbare Stoffe werden auf das Volumen der Wasserprobe bezogen, in der sie bestimmt wurden und in mg/l angegeben. Hier Bestimmung mit Membranfilter, Porenweite 0,45 µm.

Gesamttrockenrückstand, DIN 38409, Tl. 1 (1987-01) DEV H 1:
Definition: Die volumenbezogene, nach einem festgelegten Trocknungsverfahren zurückbleibende Masse an gelösten und ungelösten Wasserinhaltsstoffen, soweit sie unter den Bedingungen dieses Verfahrens nicht flüchtig sind. Der Gesamttrockenrückstand wird auf das Volumen der eingesetzten unfiltrierten Wasserprobe (Vp) bezogen und in mg/l angegeben.

DOC Dissolved Organic Carbon, DIN 38409, Tl. 3 (1983-06) (seit 1997 DIN EN 1484 (1997-08) DEV H 3):
Definition: Unter dem DOC versteht man den gelösten organisch gebundenen Kohlenstoff. Es ist ein in der Wasseranalyse verwendeter Parameter, der den in den gelösten organischen Verbindungen enthaltenen Kohlenstoff summarisch umfasst, (Gemäß OECD, 17.7.92, 301, Annex IV.4: Dissolved organic carbon (DOC) is by definition the organic carbon of any chemical or mixture in water passing through a 0,45 µm filter. (Further hints about filters, sampling, samples preservation are given).

Leitfähigkeit, DIN EN 27888 (1993-11) DEV C 8:
Definition: Elektrische Leitfähigkeit ist der Reziprokwert des Widerstandes, gemessen an den entgegengesetzten Seiten eines Einheitskubus einer wässrigen Lösung mit bestimmten Ausmaßen unter speziellen Bedingungen. Für Untersuchungen der Wasserbeschaffenheit wird dies oft ausgedrückt als "elektrische Leitfähigkeit" und kann als Maß für die Konzentration ionisierbar gelöster Stoffe in einer Probe verwendet werden. Reines Wasser hat aufgrund seiner Eigendissoziation bei 25 °C eine elektrische Leitfähigkeit von 5,842 µS/m = 0,05842 µS/cm.

Trübung, DIN EN 27027 (1994-03) (seit 2000 DIN EN ISO 7027 (2000-04) DEV C 2):
Definition: Verringerung der Durchsichtigkeit einer Flüssigkeit verursacht durch die Gegenwart ungelöster Substanzen. Einheiten: **FAU** (Formazine Attenuation Units; Formazin-Schwächungseinheiten); **FNU** (Formazine Nephelometric Units; Formazin-Nephelometrieeinheiten. **NTU** (Nephelometric Turbidity Units) n. Standard Methods, 18. Aufl. (1992) ist identisch mit FNU gemäß der DIN.

3.2 Praktischer Einsatz einer Pilotanlage

Im Rahmen interner Betriebsversuche wurde eine Untersuchung des AWR-Filtersystems, s. Abb. 20, bei DaimlerChrysler, Sindelfingen im Zeitraum vom 13.09.1995 bis 03.07.1996. durchgeführt. Das aufzubereitende Wasser stammte von einer Drahterosionsmaschine des Typs AGI-CUT 200, die bis dahin konventionell mit Papierfiltern betrieben wurde.

Die Maschine wurde nicht für die Serienproduktion, sondern ausschließlich für Einzelanfertigungen eingesetzt, was zu Beschränkungen der Dauer der Filterläufe führte. Bearbeitete Materialien waren Stähle und Kupfer.

Abb. 20: AWR-Filteranlage bei DaimlerChrysler, Sindelfingen
(Vordergrund: Absetzbecken mit Schlammfangkorb, Rückspültank, s. Abb. 19)

3.3 Ergebnisse

Der Betrieb der Anlage während des Versuchszeitraumes ist durch die in Tab. 4 zusammengestellten Kenngrößen charakterisiert:

Tab. 4: Angaben zum Filterbetrieb

Parameter		Wert
Filter		
Rückspülzyklus voreinstellbar (frei programmierbare Steuerung: kundenspezifische Anpassung möglich).		
Gewählt	in h	6
Rückspüldauer in min. (Luft/Wasser Spülung)		3
Absetzbecken		
Schlammablass nach Rückspülzyklen		12
Dosierung Flockungsmittel (1 g/l) in Absetzbecken je Rückspülung (Praestol 2500, Stockhausen, Krefeld)	in ml	100

Ergebnisse mit der neu konzipierten Anlage vor Ort bei DaimlerChrysler, Sindelfingen sind nachfolgend für drei Untersuchungstage in Tab. 5 zusammengestellt. Obwohl die Zahl der Untersuchungen unzureichend ist, lassen sich doch einige Feststellungen treffen.

Sauerstoff:

Im Normzustand ist die O_2-Sättigungskonzentration von reinem Wasser bei 25 °C, 1013,25 mbar, 8,26 mg/l O_2, DIN EN 25814 (1992-11) DEV G 22.
Die gemessenen Sauerstoffkonzentrationen sind dem Sättigungswert sehr nahe. Es sind keine Auffälligkeiten zu verzeichnen. Daraus kann nicht geschlossen werden, dass im Filter keine mikrobielle Aktivität auftritt.
Unauffällig sind auch die pH- und Temperaturwerte.

Leitfähigkeit:

Das System wurde im Untersuchungszeitraum in einem engen Bereich der elektrischen Leitfähigkeit um ca. 10 µS/cm betrieben. Nur im Absetzbecken war einmal ein geringfügig erhöhter Wert zu beobachten.
Die Flockungsmittellösung selbst hatte einen Leitwert von 16,7 µS/cm, d.h. der Einfluss auf die Veränderung der Leitfähigkeit ist, bedingt durch die geringe Menge, als vernachlässigbar einzustufen.
Das verwendete deionisierte Wasser hatte einen Leitwert von 2,3 µS/cm.

Abfiltrierbare Stoffe:

Die Filterwirkung ist sehr gut. Die Konzentration im Ablauf des Filters liegt mit einem Wert < 1 mg/l durchgehend unterhalb der Nachweisgrenze.

Ammonium, Nitrit, Nitrat:

Eine wie auch immer geartete Stickstoffbewegung war nicht zu verzeichnen. Man darf davon ausgehen, dass bedingt durch die geringe elektrische Leitfähigkeit der mikrobielle Umsatz eingeschränkt ist.

Orthophosphat:

Durch den Filtrationsvorgang war eine geringfügige Abnahme des gelösten PO_4^{3-}-Wertes festzustellen, deren Ursache nicht zu klären war.

DOC:

Alle DOC-Wert liegen in einem Bereich unter 3,5 mg/l. Eine Veränderung durch die Filtration war nicht zu erwarten. Die Daten zeigen keine Auffälligkeiten.

Trübung:

Im Gegensatz zu den DOC-Werten sind die Trübungswerte im Filterablauf eindeutig besser als im Zulauf, so dass die Filtration wie erwartet zu einer Qualitätsverbesserung führte.

Schlamm:

Sorge bereitete der Sandgehalt im Schlammkorb. Hier sind konstruktive Verbesserungen erforderlich, um den Sandaustrag durch die Rückspülung zu verringern.

Regeneration des Filters:

Über einen Zeitraum von 75 d wurde vom Betriebspersonal zu unregelmäßigen Zeiten, d.h. als "Zufallsereignis" der Volumenstrom, der Druck am Filterein- und -ausgang notiert. Aus diesen Daten und Schätzwerten für die Porosität $\varepsilon = 0{,}4$, dem mittleren Korndurchmesser d_m und einer als konstant angenommenen Betthöhe z wurde der **Widerstandsbeiwert** ψ des Filters (Filterschicht + Düsenboden zusammengefasst) summarisch n. Gl. 9 ermittelt.

Da das Ablesen der jeweiligen Messwerte nicht gezielt nach dem Rückspülvorgang erfolgte, lässt Abb. 21 keine definitive Aussage über eine vielleicht unzureichende Regeneration des Filterbettes zu. Hier handelt es sich um eine "Zufallsverteilung" des Widerstandsbeiwertes ψ über die Laufzeit. Seine Berechnung über die Betriebszeit hinweg gibt langfristig einen Hinweis über eine eventuell nicht ausreichende Regeneration des Bettes, Verstopfung des Düsenbodens u.a.m.

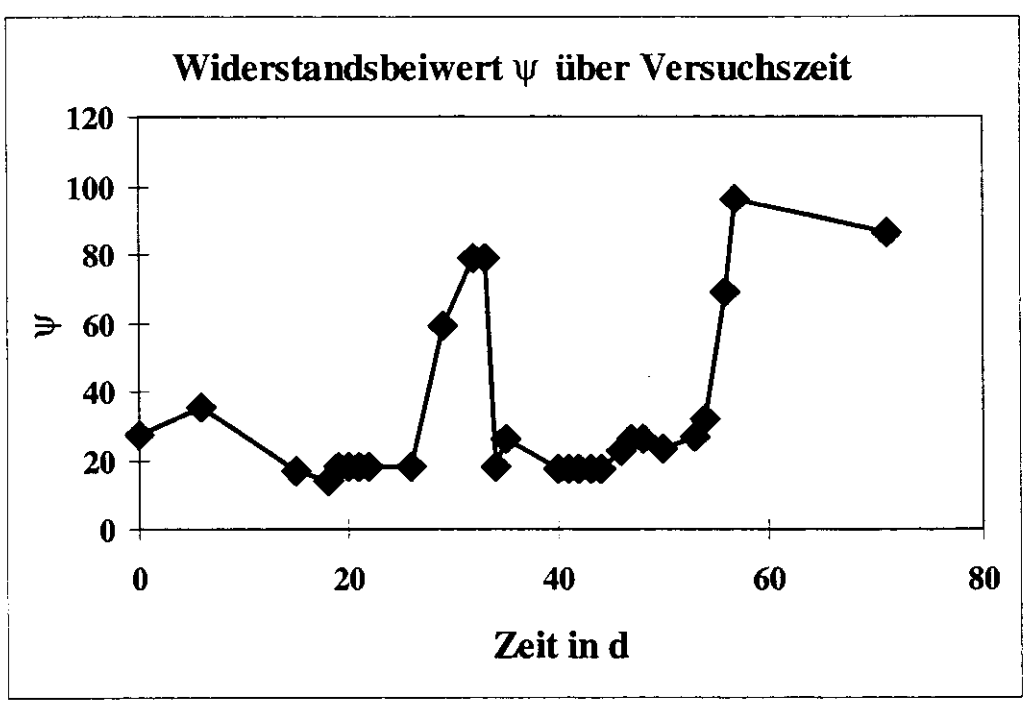

Abb. 21: Widerstandsbeiwert ψ n. Gl. 9 (Annahmen: dm = 1 mm, $\varepsilon = 0{,}4$, z = 1 m)

Tab. 5 ABAG-AWR: Probenahme bei DaimlerChrysler, Sindelfingen am 19.12.1995, 03.04.1996, 21.05.1996

Proben-Ort Nr.	Probenahme-stelle bzw. Messstelle	Datum	Sauerstoff mg/l O_2	pH	Temperatur °C	Leitfähigkeit (25 °C) µS/cm	Abfiltrierb. Stoffe mg/l	Trokkenrückstand mg/l	Ammonium mg/l $N\text{-}NH_4^+$	Orthophosphat mg/l $P\text{-}PO_4^{3-}$	Nitrat mg/l $N\text{-}NO_3^-$	Nitrit mg/l $N\text{-}NO_2^-$	DOC mg/l C	Trübung bei 860 nm FAU	Dichte g/ml	Trockensubstanz Massenanteil %
			Gerät OXI 96, WTW	Gerät pH 96, WTW	Gerät pH 96, WTW	Gerät LF 91, WTW	DIN 38409-H2-1 Filter 0,45 µm	DIN 38409-H1-1	Methode WTW Test A4	Methode WTW Phosphat 10	Methode Merckoquant 10020 und IC	Methode Merckoquant 10007 und IC		DIN EN 27027 Photometer Ultrospec III		
			Messungen vor Ort ♣													
1	Becken Maschine, beim Schneiden	19.12.95	7,3	6,6	25,4	10,8	< 1	24	0,03	0,36	< 0,2	< 0,1	2,5	15		
1	- " -	03.04.96	7,5	7,1	26,3	10,6	9	27	0,02	0,1	< 0,2	< 0,1	1,1	21		
1	- " -	21.05.96	7,0	6,9	27,0	10,4	1	< 1	< 0,02	< 0,05	< 0,2	< 0,1	0,8	22		
2	Schmutzwasserbecken, Zul. Filter	19.12.95	7,6	6,6	25,4	10,4	< 1	24	< 0,02	0,14	< 0,2	< 0,1	1,5	20		
2	- " -	03.04.96	7,2	7,2	26,4	10,7	16	40	0,02	0,08	< 0,2	< 0,1	1,0	30		
2	- " -	21.05.96	6,8	7,0	27,5	10,4	5	< 1	< 0,02	< 0,05	< 0,2	< 0,1	1,4	17		
3	Sauberwasserbecken, Abl. Filter	19.12.95	7,3	6,6	25,2	10,1	< 1	20	< 0,02	0,13	< 0,2	< 0,1	3,5	15		
3	- " -	03.04.96	8,0	7,2	25,7	10,2	< 1	15	< 0,02	0,06	< 0,2	< 0,1	0,9	17		
3	- " -	21.05.96	7,7	7,0	26,7	8,9	< 1	< 1	< 0,02	< 0,05	< 0,2	< 0,1	1,7	8		
4	Absetzbecken	19.12.95	7,5	6,7	24,5	12,2	43	51	< 0,02	0,06	< 0,2	< 0,1	1,0	111		
4	- " -	03.04.96	8,4	7,1	25,1	10,9	40	59	0,02	0,06	< 0,2	< 0,1	1,1	152		
4	- " -	21.05.96	7,7	7,0	26,3	11,4	136	116	< 0,02	0,12	< 0,2	< 0,1	2,2	308		
5	Schlammkorb	19.12.95													1,5	48
5	- " -	03.04.96													1,5	48
5	- " -	21.05.96													1,7	58
6	Verwendetes deionisiertes Wasser	19.12.95		7,1	26,2	2,3										

Anmerkung: ♣, Mittelwerte aus jeweils drei Messungen in einem Zeitraum von ca. 1,5 h

4 Beurteilung der Anlage, Empfehlungen

Die technische Erprobung einer Neuentwicklung unter Praxisbedingungen ist eine Chance, eventuell vorhandene technische Mängel aufzuzeigen und bei den Nachfolgetypen auszuräumen.

- Der Betrieb der Filteranlage war als "normal" zu bezeichnen. Alles deutet darauf hin, dass das System nach dem bisherigen Stand der Kenntnis als funktionstüchtig und betriebssicher anzusehen ist.
- Die beobachteten Sandverluste lassen sich durch konstruktive Veränderungen wie auch durch entsprechende Änderungen des Rückspülprogramms beheben.
- Hervorzuheben ist die Verbesserung der Arbeitsbedingungen und die nutzerfreundliche Art, den Schlamm über einen Schlammfangkorb ohne Maschinenstillstand periodisch entfernen zu können. Dies trägt zu einem verringerten Wartungsaufwand bei. Der lästige und mit erheblichem Schmutzanfall verbundene Wechsel der Papierfilter entfällt.
- Durch die frei programmierbare Steuerung lässt sich das System problemlos an die Betriebsbedingungen z.B. durch Veränderung der Rückspülfrequenz, der Rückspülintensität, aber auch der Flockungsmittelzugabe entsprechend anpassen.
- Ob das verwendete Material zur Konstruktion des Filtersystems optimal ist und sich angesichts des sehr aggressiven Wassers andere Werkstoffe besser eignen als die bislang verwendeten Kunststoffe, ist noch offen. Als Option ist Edelstahl in der Diskussion.

Empfehlungen

Wir empfehlen dem Anwender bei ausreichendem Platz, zusätzlich den Betrieb eines Lamellenabscheiders vorzusehen. Die Rückspülfrequenz des Filters lässt sich so herabsetzen. Weiter kann dadurch die Häufigkeit des Sandaustausches verringert werden.

In Tab. 2 ist die Wasser-Rückspülgeschwindigkeit für ein Sandbett bei einer Expansion um 50 % mit einem mittleren Korndurchmesser $d_m = 0{,}86$ mm angegeben mit $v_{Rmax} \approx 94$ m/h. Wir legen diesen Wert für eine effektive Wasserrückspülung unter den gegebenen Bedingungen zugrunde.

Vergleicht man diesen Wert mit den Sedimentationsgeschwindigkeiten von Kugeln (Fe, Cu), dann lässt sich aus Abb. 7 erkennen, dass unter Vernachlässigung des "Schwarmeffektes" bei dieser Rückspülgeschwindigkeit nur Partikelgrößen $d_p < 0{,}1$ mm aus dem Sandbett sicher entfernt werden können.

Wir können nicht ausschließen, dass Partikel größeren Durchmessers auftreten. Eigene Messungen, s. Abb. 5, und Messungen anderer, s. Abb. 6, lassen zwar vermuten, dass die Häufigkeit des Auftretens von Partikeln mit $d_p > 0{,}1$ mm gering, doch nicht auszuschließen ist. Aus diesem Grunde kann ein zusätzlicher Lamellenabscheider von Vorteil sein. Partikel (aus Fe oder Cu) mit einem Durchmesser $d_p > 0{,}1$ mm setzen sich in ihm sehr schnell ab, s. Abb. 8.

5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

5.1 Einführung

Die nachfolgende, von der ABAG-itm, Fellbach, erstellte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigt, dass insbesondere bei der Installation einer Filtrationsanlage für zwei Erodiermaschinen neben den ökologischen auch ökonomische Vorteile zu erzielen sind.

Bei den tabellarisch dargestellten Kostenvergleichen, s. Tab. 6 und Tab. 7, wird davon ausgegangen, dass Drahterodiermaschinen derzeit werksseitig mit konventionellen Filtersystemen, d.h. mit Filterpatronen ausgestattet sind. Je nach Verlauf der Entwicklung in diesem Sektor kann davon ausgegangen werden, dass in Zukunft die Maschinen mit alternativen Filtrationssystemen ausgestattet werden können.

Das im Rahmen dieses Projekts an einer Drahterodiermaschine erprobte rückspülbare Filtersystem kann auch als zentrale Einheit für mehr als eine Maschine ausgelegt und betrieben werden. Es sind daher Kostenbetrachtungen für ein Ein-Maschinensystem sowie eine zentrale Anlage für zwei Erodiermaschinen durchgeführt worden.

5.2 Erläuterungen und Randbedingungen zum Kostenvergleich

Kapital- und Finanzierungskosten:

Ein Vergleich beider Systeme ist hier schwierig, da die konventionellen Filtereinrichtungen generell im Maschinenpreis enthalten sind und damit eine eindeutige Kostenerfassung nicht möglich ist. Zur Gegenüberstellung wurde von einem Anschaffungspreis für die konventionellen Filtereinrichtungen von 15.000 DM ausgegangen.

Der Anschaffungspreis für ein rückspülbares Filtersystem für eine Drahterodiermaschine wird mit 30.000 DM angesetzt.

Die Finanzierungskosten errechnen sich aus der Formel 0,5 x Investitionskosten x Zinssatz (%) /100. Der Zinssatz wurde mit 8 % angenommen.

Verbrauchsmaterial:

Filterpatronen: Es wird davon ausgegangen, dass die Erodiermaschine im Zweischichtbetrieb eingesetzt wird (entspricht 3680 h/a). Die Standzeit der Erodierpatronen beträgt durchschnittlich 200 Betriebsstunden. Damit werden im Schnitt 18,4 Filterwechsel je Jahr erforderlich.

Je nach Ausführung sind Drahterodiermaschinen mit 4, 8 oder teilweise auch mit 16 Filterpatronen bestückt. Zur Berechnung wird von 8 Filterpatronen ausgegangen.

Die durchschnittlichen Kosten liegen bei 150,- DM/ 4 Stück + MwSt., was ein Einzelpreis von 43,50 DM ergibt.

Sandbett: Durch Verschmutzung und nicht ausreichende Regeneration lässt die Filterwirkung des Sandbetts langfristig nach. Nach bisherigen Betriebserfahrungen ist ein Austausch alle zwei Jahre ratsam. Eine Anlage

hat zwei Filtersäulen à 20 l Kiesbett = 40 l. Die Filtersandkosten betragen ca. 40,- DM.

Zusätzliche Wartungskosten:

Filterpatronenaustausch: Der durchschnittliche Zeitaufwand zum Austausch der Filterpatronen (oftmals wird auch nur ein Teilaustausch vorgenommen) wurde mit 20 min angegeben. Da die Erodiermaschine während des Austausches nicht weiterlaufen kann, muss der Maschinenstundensatz inkl. Personalkosten angesetzt werden zu 210,- DM/h.

Sandbettaustausch: Zum Sandbettaustausch muss die Maschine eigentlich nicht abgeschaltet werden (redundante Anordnung der beiden Filtersäulen). Da der Austausch nur alle zwei Jahre erfolgt, wird dies in der Praxis mit einer Reinigung des Systems verbunden sein, so dass auch hier von einer abgeschalteten Maschine ausgegangen wird. Der Zeitaufwand beträgt ca. 4 h (Maschinenstundensatz inkl. Personalkosten: 210,- DM/h).

Entsorgungskosten:

Verbrauchte Filterpatronen enthalten bis zu 3 kg Erodierschlamm. Je nach erodierten Werkstoffen ist der Schlamm schwermetallhaltig, so dass verbrauchte Filterpatronen, wenn keine Verwertungsmöglichkeit gegeben ist, als Sonderabfall beseitigt werden müssen.

Die Entsorgungskosten sind in diesem Bereich stark mengenabhängig:

z.B. 200 l-Fass: ca. 120,- DM/Fass

im Container: ca. 500,- DM/t

Ein beladener Filter wiegt durchschnittlich ca. 6 kg (inkl. 3 kg Erodierschlamm).

Bei 18,4 Wechseln/a x 8 Filter x 6 kg/Filter ergibt sich eine Menge von 880 kg/a.

Für deren Entsorgung werden durchschnittliche Kosten von 500,- DM/a angesetzt.

Reine Erodierschlämme sind grundsätzlich über die für Schleifschlämme inzwischen existierenden Verwertungsschienen verwertbar. Die entstehenden Kosten sind auch hier stark mengenabhängig. Sie liegen bei Stahlschlämmen bei ca. 400,- bis 500,- DM/t, für Schlämme mit hohen Hartmetallgehalten werden meist Erlöse erzielt.

Aufgrund der geringen anfallenden Mengen wird hier mit Verwertungskosten von ca. 500 DM/t gerechnet.

Anfallende Mengen: ca. 3 kg Schlamm/Filter. Bei 18,4 Wechseln/a x 8 Filter x 3 kg/Filter ergibt sich ein durchschnittlicher Schlammanfall von ca. 440 kg/a.

Ausgetauschtes Sandbett: Aufgrund der meist schwermetallhaltigen Verschmutzung wird davon ausgegangen, dass der ausgetauschte Sand als Sonderabfall beseitigt werden muss.

Die Kosten hierfür betragen ca. 500,- DM/t (Sonderabfalldeponie, kleine Mengen).

5.3 Kostenvergleich für eine und zwei Drahterodiermaschinen: Filterpatronen und rückspülbares Filtersystem

Tab. 6: Kostenvergleich für **eine** Drahterodiermaschine mit Filterpatronen und mit rückspülbarem Filtersystem (Ein-Maschinensystem)

Kostenarten	*Konventionell mit Filterpatronen*		*Mit rückspülbarem Filtersystem*	
Investitionskosten:	ca. 15.000 DM, im Maschinenpreis enthalten		Filteranlage: ca. 30.000 DM	
		DM/a		DM/a
Kapital- und Finanzierungskosten	10 a Abschreibung,	1.500,00	10 a Abschreibung,	3.000,00
	8 % Zins	600,00	8 % Zins	1.200,00
Summe:		2.100,00		4.200,00
	Verteuerung:			**2.100,00**
Verbrauchsmaterialkosten:				
		DM/a		DM/a
Filterpatronen	18,4 Wechsel/a x 8 Filter x 43,50 DM	6.403,20		
Kiesbett			0,5 Wechsel/a x 40 l Kies x 1,00 DM/l	20,00
Summe:		6.403,20		20,00
	Einsparung:			**6.383,20**
Zusätzliche Wartungskosten:				
		DM/a		DM/a
Zeitaufwand für Filterwechsel Kiesbettaustausch	18,4 Wechsel/a x 20 min. x 210 DM/h	1.288,00		
			0,5 Wechsel/a x 4 h x 210,00 DM/a	420,00
Summe:		1.288,00		420,00
	Einsparung:			**868,00**
Entsorgungskosten:				
		DM/a		DM/a
Filter Kiesbett	ca. 880 kg/a	500,00		
			0,5 Wechsel x 0,08 t x 500 DM/t	20,00
Erodierschlamm			0,44 t x 500 DM/t	220,00
Summe:		500,00		240,00
	Einsparung:			**260,00**
Summe Betriebskosten in DM/a:		**10.291,20**		**4.880,00**
Gesamteinsparung in DM/a:				**5.411,20**
Amortisationszeit: 5,54 Jahre				

Tab. 7: Kostenvergleich für **zwei** Drahterodiermaschinen mit Filterpatronen und einem gemeinsamen rückspülbaren Filtersystem (Zentralsystem)

Kostenarten	***Konventionell mit Filterpatronen***		***Mit rückspülbarem Filtersystem***	
Investitionskosten:	ca. 2 x 15.000 DM, im Maschinenpreis enthalten		Filteranlage: Ca. 37.000 DM	
		DM/a		DM/a
Kapital- Und Finanzierungskosten	10 a Abschreibung,	3.000,00	10 a Abschreibung,	3.700,00
	8 % Zins	1.200,00	8 % Zins	1.480,00
Summe:		4.200,00		5.180,00
	Verteuerung:			**980,00**
Verbrauchsmaterialkosten:				
		DM/a		DM/a
Filterpatronen	18,4 Wechsel/a x 16 Filt. x 43,50 DM	12.806,40		
Kiesbett			0,5 Wechsel/a x 80 l Kies x 1,00 DM/l	40,00
Summe:		12.806,40		40,00
	Einsparung:			**12.766,40**
Zusätzliche Wartungskosten:				
		DM/a		DM/a
Zeitaufwand für Filterwechsel	18,4 Wechsel/a x 35 min. x 210 DM/h	2.254,00		
Kiesbettaustausch			0,5 Wechsel/a x 6 h x 210,00 DM/a	630,00
Summe:		2.254,00		630,00
	Einsparung:			**1.624,00**
Entsorgungskosten:				
		DM/a		DM/a
Filter	ca. 1.760 kg/a	900,00		
Kiesbett			0,5 Wechsel x 0,16 t x 500 DM/t	40,00
Erodierschlamm			0,88 t x 500 DM/t	440,00
Summe:		900,00		480,00
	Einsparung:			**420,00**
Summe Betriebskosten in DM/a:		**20.160,40**		**6.330,00**
Gesamteinsparung in DM/a:				**13.830,40**
Amortisationszeit: 2,67 Jahre				

5.4 Schlussfolgerung

Bei den Kostenbetrachtungen wird deutlich, dass die Investitionskosten sowie das Verbrauchsmaterial, d.h. die Filterpatronen die wesentlichen Faktoren sind.

Aufgrund der deutlich höheren Investitionskosten bei einem Ein-Maschinensystem führen die jährlichen Einsparungen mit 5.411,- DM zu einer Amortisationszeit von ca. 5,5 Jahren.

Die Abfallverminderung beträgt ca. 50 %.

Bei einem zentralen System für zwei Maschinen ergibt sich ein deutlich positiveres Bild. Da sich der Gesamtaufwand des Filterwechsels bei zwei separat betriebenen Erodiermaschinen nahezu verdoppelt und die Verbrauchsmaterialkosten (Filterkartuschen) als größter Einzelposten linear in die Rechnung eingehen, werden hier die Vorteile eines zentralen Filtersystems deutlich sichtbar. Die Investitionen steigen nur um ca. 25 %, die Wartungskosten um max. 50 %. Insgesamt ergibt sich bei dieser Variante eine auch betriebswirtschaftlich sehr interessante Amortisationszeit von ca. 2,6 Jahren.

6 Beurteilung der Übertragbarkeit und Umsetzung in die Praxis

Die hier vorgelegten Ergebnisse beruhen auf Versuchen in der Praxis. Das AWR-Filtersystem wurde bei DaimlerChrysler, Sindelfingen, in einem betriebsinternen Versuch beim Drahterodieren von Kupfer und Stahl eingesetzt.

Die Ergebnisse bei der Wasserreinigung entsprechen vollauf den Erwartungen. Durch die Flexibilität in der Steuerung des Filters und entsprechende Anpassungen an die betrieblichen Gegebenheiten ist ein Filtersystem verfügbar, das kundenspezifischen Wünschen entsprechen kann.

Es ist zu erwarten, dass das AWR-Filtersystem nach dem jetzt vorliegenden Kenntnisstand (bezogen auf Drahterosion von Kupfer und Stahl) auch in anderen Bereichen der Drahterosion aller Voraussicht nach "problemlos" eingesetzt werden kann.

Ein Anwenderschwerpunkt des Einsatzes dieser Filtrationstechnik ist in Baden-Württemberg; denn von rd. 10000 Drahterodiermaschinen in der BRD befinden sich ca. 6000 in diesem Bundesland.

7 Schrifttumsverzeichnis

ABAG (Hrsg.) (1997): Sonderabfall-Entsorgung, Rechtsgrundlagen, branchenspezifische Arbeitsmaterialien, Bd. II: Metallbe- und -verarbeitung, Fellbach.

ABAG-Projekt Nr. 147 (1998): Aufarbeitung von Mischbettionenaustauscherharze aus Drahterodiermaschinen für den Wiedereinsatz sowie zur Rückgewinnung der von den Harzen aufgenommenen Metalle.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOC. (1992): Standard Methods for the examination of water and wastewater, 18. Ed.

AMIRTHARAJAH, A., J. L. CLEASBY (1972): Predicting backwashing of filters during backwashing, J. Am. Wat. Wrks. Assoc., 5, 74 ff.

BRAUER, H. (1971): Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen, Aarau: Sauerländer.

DERIVE (1992): Mathematikassistent für Ihren Personal Computer, Version 2, Software House Inc., Honolulu, U.S.A.

DEV Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung (2001, 49. Lief.), Hrsg. Wasserchem. Gesellsch., Normenaussch. Wasserwesen, Weinheim: Wiley-VCH.

HAAS, R. (1994): Erodieren von Werkzeugeinsätzen, 4. Exeron - Technologietag Funkenerosion, 28.10.1994, Veranst.: H. Walter, Werkzeug- und Maschinenbau GmbH, 78737 Fluorn-Winzeln.

HAHN, H. (1987): Wassertechnologie, Berlin: Springer.

HUISMAN, L. (1973): Lecture Notes: Sedimentation and Flotation, Mechanical Filtration, Delft University, Departm. of Civil Engineering, Div. of Sanitary Engineering.

IVES, K. (1973): Capture Mechanisms in Filtration in: The Scientific Basis of Filtration, NATO Advanced Study Institute, 2-20.7.1973, Cambridge, UK.

KIßLER, H. (1996): Abfallarme Metallbe- und -verarbeitung: Ansatzpunkte beim Erodieren, Tagungsunterlagen "Abfallarmes Erodieren", 3.12.1996, Birkenfeld, ABAG Kolloquium, Fellbach.

MEYER, H. (1979): Untersuchungen zur weitergehenden Reinigung biologisch gereinigten Abwassers - Die praktische Anwendung der Sandfiltration und ihre Bedeutung in der Abwassertechnologie, Gesell. Förder. Siedlungswasserwirtsch. RWTH Aachen, Aachen.

MÜLLER, W.-R., TH. WEINER, M. SILLMANN (1996): Rückspülbare Filtersysteme beim Erodieren, ABAG-Seminar: "Abfallarmes Erodieren", Birkenfeld, 3.12.1996.

MVT (1989): Programmpaket Mechanische Verfahrenstechnik, Vers. 1.02, M. ZOGG, CH-Oberburg.

OSTERROTH, D., Hrsg. (1979): Chemisch-Technisches Lexikon, Berlin: Springer.

ROTH, M. (1983): Wahl von Mikrosieben oder Kornfiltern unter Berücksichtigung der Filtrationseigenschaften der Abwassersuspension, 58. Siedl. Wass. Wirtsch. Kolloq.: Weitergehende Abwasserreinigung, Leistungssteigerung bestehender Anlagen, Stuttg. Ber. Siedl. Wass. Wirtsch., Bd. 78, München: Oldenbourg.

ROTH, M., P. PINNOW (1981): Die Größenverteilung der suspendierten Stoffe in biologisch gereinigten Abwässern, Vom Wass. 57, 309-327.

STORR, M. (1994): Erosions-Kolleg, 4. Exeron - Technologietag Funkenerosion, 28.10.1994, Veranst.: H. Walter, Werkzeug- und Maschinenbau GmbH, 78737 Fluorn-Winzeln.

WETZLER, H. (1985): Kennzahlen der Verfahrenstechnik, Heidelberg: A. Hüthig.

YAO, K.M., M.T. HABIBIAN, C.R. O'MELIA (1971): Water and Wastewater Filtration: Concepts and Applications, Environm. Sci. Technol., 5, 1105 ff.

ZIMMERMANN, M. (1994): Umweltgerechte Aufbereitung von Arbeitsmedien, 3. Aach. Fachtag. Funkenerosive Bearbeitung, 23.9.1994.

ZOGG, M.(1993): Einführung in die mechanische Verfahrenstechnik, 3. Aufl., Stuttgart: B.G. Teubner.

8 Abkürzungsverzeichnis

		Dimension
Ar_p	Archimedeszahl, Partikel	1
DEV	Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung	
d_m	Gleichwertiger Kugeldurchmesser, Füllkörperschüttung	m
d_p	Partikeldurchmesser bei Kugelform	m
FAU	Formazine Attenuation Units, n. DIN EN 27027 (1994-03)	experimentell definiert
FNU	Formazine Nephelometric Units, n. Standard Methods, 18. Aufl., 1992	experimentell definiert
g	Erdbeschleunigung	m/s^2 (9,81 m/s^2)
L	Höhe, Länge	m
NTU	Nephelometric Turbidity Units (n. Standard Methods, 18. Aufl., 1992) ≡ FNU (n. DIN EN 27027 (1994-03)	experimentell definiert
Δp	Druckverlust	Pa (≡ kg m/(s^2 m^2), bar, m WS
Δp_{FP}	Druckverlust am Fluidisierungspunkt	Pa, bar, m WS
Re_p	Reynoldszahl, Partikel	1
Re_{po}	Reynoldszahl, Partikel, stationäre Geschwindigkeit	1
T	Temperatur	°C
t_P	Sedimentationszeit	min
v_F	Filtergeschwindigkeit	m/h, m/s
v_{FP}	Fluidisierungsgeschwindigkeit	m/h, m/s
v_P	Stationäre Sinkgeschwindigkeit	m/h, m/s
v_{Rmax}	Rückspülgeschwindigkeit, Expansion Filterschicht 50 %	m/h
z_0, z	Filterbetthöhe	m
ε	Porosität	1
η_F	dynamische Zähigkeit, Flüssigkeit	Pa s = N s/m^2 = kg/(m s)
ν_F	kinematische Zähigkeit, Flüssigkeit	m^2/s
ψ	Widerstandsbeiwert	1
ρ_F	Dichte, Flüssigkeit	kg/m^3, kg/l, g/cm^3
ρ_P	Dichte, Partikel	kg/m^3, kg/l, g/cm^3
ρ_m	Dichte, Filtermittel: z.B. Sand	kg/m^3 (2650 kg/m^3)
ρ_W	Dichte, Wasser	kg/m^3 (1000 kg/m^3)

Viskosität von Wasser bei 25 °C:
η_F in Pa s = $0{,}8904 \cong 10^{-3}$
ν_F in m^2/s = $0{,}8030 \cong 10^{-6}$

Dichtewerte:
Al: 2,7 g/cm^3; Cu: 8,9 g/cm^3; Fe: 7,9 g/cm^3

9 Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Versuche zur Reinigung / Regeneration von Filterpatronen mit Metallgewebe

Tab. 2 Fluidisierungspunkt FP eines Sandbettes

Tab. 3 Angaben zum Filtersystem

Tab. 4 Angaben zum Filterbetrieb

Tab. 5 ABAG-AWR: Probenahme bei DaimlerChrysler, Sindelfingen am 19.12.1995, 03.04.1996, 21.05.1996

Tab. 6 Kostenvergleich für eine Drahterodiermaschine mit Filterpatronen und mit rückspülbarem Filtersystem (Ein-Maschinensystem)

Tab. 7 Kostenvergleich für zwei Drahterodiermaschinen mit Filterpatronen und einem gemeinsamen rückspülbaren Filtersystem (Zentralsystem)

10 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Prozessschema zu den Erodierverfahren

Abb. 2 Abfälle beim Senkerodieren

Abb. 3 Abfälle beim Drahterodieren

Abb. 4 Schema einer Aufbereitungsanlage (Zimmermann, 1994)

Abb. 5 Summenhäufigkeit der Partikelvolumenverteilung bei einem Erodierschlamm (Stahl)

Abb. 6 REM-Aufnahme beim Erodieren entstehender kugelförmiger Partikel, Maßstab: 40 μm, s. Bildrand unten (Oel-Held, Erosions-Kolleg, Stuttgart)

Abb. 7 Sedimentationsgeschwindigkeit v_P eines Einzelkorns (Kugel) als Funktion des Partikeldurchmessers d_p (Material-Dichten Al: 2,7 g/cm³, Fe: 7,9 g/cm³, Cu: 8,9 g/cm³)

Abb. 8 Sedimentationszeit t_P eines Einzelkornes (Kugel) als Funktion des Partikeldurchmessers d_p für eine Höhe L = 0,1 m (Material Al, Cu, Fe)

Abb. 9 Schematische Darstellung von Porengrößen und Filtermedien (Roth, 1983)

Abb. 10 Filterpatronen, Papier als Filtermittel (Mann+Hummel, Ludwigsburg)

Abb. 11 Filterpatronen, Metallgewebe als Filtermittel (GKD-Gebr. Kufferath GmbH & Co. KG, Düren)

Abb. 12 Prinzip der Filtration (Hahn, 1987)

Abb. 13 Filterwirkung als Funktion der Partikelgröße (Yao et al., 1971)

Abb. 14 Schema eines Druckfilters (Hahn, 1987)

Abb. 15 Fluidisation eines aufwärts durchströmten Filterbettes (Zogg, 1993)

Abb. 16 Filterdüse für Anströmboden (Wasser-Luft- Rückspülung möglich) (KSH GmbH, Herford)

Abb. 17 Ansicht Filtersystem ECONE (Fabimex, SA, Losone, CH)

Abb. 18 Ansicht Filtersystem KERAFIL ECO DE (Kerafol, Eschenbach)

Abb. 19 Prozessführung der AWR-Filteranlage (vereinfacht)

Abb. 20 AWR-Filteranlage bei DaimlerChrysler, Sindelfingen (Vordergrund: Absetzbecken mit Schlammfangkorb, Rückspültank, s. Abb. 19)

Abb. 21 Widerstandsbeiwert ψ n. Gl. 9 (Annahmen: dm = 1 mm, ε = 0,4, z = 1 m)