

# Anwendung der magnetischen Separation zur Abwasserreinigung

M. Franzreb, ITC

## Einleitung

Eine Suche nach auf Magnettechnik basierenden Prozessen in gängigen Lehrbüchern zur Verfahrenstechnik der Wasser- bzw. Abwasserbehandlung bleibt zu meist erfolglos oder liefert nur das einfache Beispiel der Entfernung metallischer Feinstpartikel aus Abwässern der Stahl- und Hüttenindustrie. Dieser Umstand spiegelt die Tatsache wieder, dass magnetologische Verfahren trotz verschiedener Vorteile bisher keine breite Anwendung in dem genannten Aufgabengebiet gefunden haben. Zu den wenigen etablierten Einsatzgebieten gehören die Entfernung von Korrosionsprodukten aus dem Kondensatkreislauf von Kraftwerken, insbesondere Kernkraftwerken, die erwähnte Abtrennung metallischer Feinstpartikel aus Abwässern der Stahl- und Hüttenindustrie sowie die Sicherung von Produkten und Produktionsanlagen gegen das versehentliche Einbringen metallischer Teile.

Neben dieser relativ geringen Anzahl technisch realisierter Anwendungen gibt es jedoch zahlreiche im Labor- oder Pilotmaßstab erprobte Verfahren, die unter Einsatz von Magnettechnik innovative Ansätze zur Lösung wasser-technologischer Aufgabenstellungen liefern. Ein Großteil der hinter diesen Verfahren stehenden Grundideen stammt dabei bereits aus den siebziger und achtziger Jahren, wobei in den meisten Fällen der hohe Preis der damals zur Verfügung stehenden Magnetsysteme eine industrielle Nutzung verhinderte. Die Preise für supra-leitende Magnetspulen und ins-

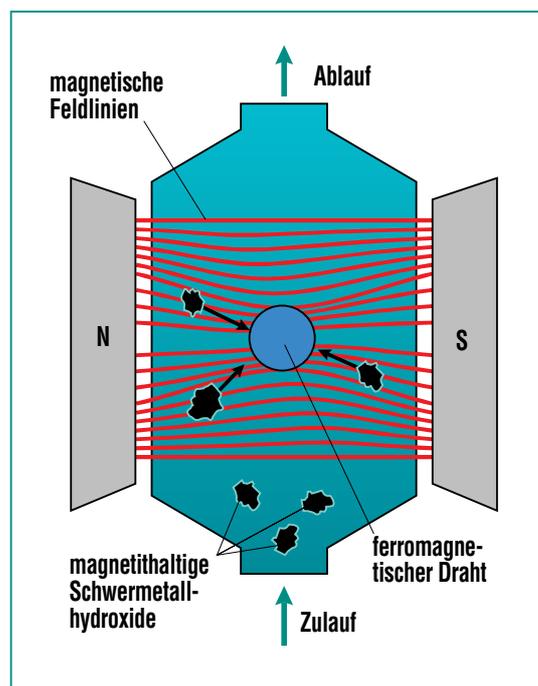
besondere für Permanentmagnetsysteme auf Seltenerdbasis sind innerhalb des letzten Jahrzehnts jedoch stark gesunken, so dass es sich lohnt, diese Ansätze in modifizierter Form und mit moderner Magnettechnologie neu zu untersuchen und zu bewerten. Im Folgenden werden daher nach einer kurzen Erläuterung des Prinzips der Hochgradienten-Magnetseparation die am Institut für Technische Chemie, Bereich Wasser- und Geotechnologie (ITC-WGT) entwickelten Karussell-Magnetseparatoren sowie deren Anwendungspotenzial auf den Gebieten der Schwermetallentfernung und der Phosphatelimination erläutert.

## Hochgradienten-Magnetseparatoren

Abb. 1 erläutert das Grundprinzip der Hochgradienten-Magnetseparation (HGMS) anhand einer schematischen Darstellung. In den Bereich eines äußeren Magnetfelds wird ein mit einer magnetisierbaren Abscheidematrix gefüllter Kanister eingebracht. Diese Matrix, in der Abbildung durch einen einzelnen Drahtquerschnitt symbolisiert, besteht zum Beispiel aus einer lockeren Packung grober Stahlwolle oder einem Stapel Drahtnetze. Die Matrixdrähte bündeln das äußere Magnetfeld in ihrer Umgebung und schaffen so auf ihrer Oberfläche Bereiche, die auf para-, ferri- bzw. ferromagnetische Partikel stark anziehend wirken. Die Partikel lagern sich an die Abscheidematrix an, so dass eine partikel-freie oder nur mit unmagnetischen Feststoffteilchen beladene Lösung den Separator verlässt.

Die auftretenden Magnetkräfte auf die Partikel können dabei über das Hundertfache der auf die Partikel wirkenden Gewichtskraft betragen. Hierdurch lassen sich, bei ausreichender Magnetisierbarkeit, auch im Falle von Feinstpartikeln mit wenigen Mikrometern Durchmesser Ober- bzw. Filterflächenbelastungen bis über  $100 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$  realisieren, wohingegen die zulässige Oberflächenbelastung von Sedimentationsbecken für vergleichbare Substanzen unter  $1 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$  liegt.

Die Dauer des Abscheidezyklus von Hochgradienten-Magnetseparatoren kann von mehreren



**Abb. 1: Grundprinzip der Hochgradienten-Magnetseparation.** Zu erkennen ist die Bündelung der rot eingezeichneten magnetischen Feldlinien im Bereich eines im Querschnitt dargestellten ferromagnetischen Drahts. Magnetisierbare Teilchen werden durch diese Zonen hoher Feldliniendichte angezogen und an der Drahtoberfläche abgeschieden.

Wochen, bei der Abtrennung eisenhaltiger Korrosionsprodukte aus Kondensatkreisläufen, bis hinab zu wenigen Minuten reichen. Ist die Kapazität der Abscheidematrix erschöpft, wird die Lösungszufuhr unterbrochen und es folgt eine kurze intensive Rückspülphase im Gegenstrom bei ausgeschaltetem Magnetfeld. Die abgeschiedenen Partikel fallen dabei als Konzentrat an, wobei der Feststoffgehalt jedoch selten größer drei Prozent liegt. Abschließend wird das Magnetfeld wieder eingeschaltet und eine weitere Abscheidephase kann beginnen.

Im Falle von Wässern mit einem geringen Anteil schwach magnetischer, schwermetallhaltiger Partikel liefern nach dem beschriebenen Grundprinzip zyklisch arbeitende HGMS aufgrund ihrer kompakten Bauweise und der hohen erzielbaren Feldstärken optimale Bedingungen bezüglich Durchsatz und Abscheideeffizienz. Für Anwendungsfälle, in denen große Volumenströme mit mittlerem bis hohem Gehalt an zu entfernenden Partikeln anfallen, wurden dagegen kontinuierlich arbeitende Karussell-Magnetseparatoren entwickelt. Bei diesem Typ von Magnetseparatoren befindet sich die Abscheidematrix in einer scheiben- oder ringförmigen Halterung, die kontinuierlich oder schrittweise langsam um ihre Achse rotiert. Entlang des Umfangs liegen eine oder mehrere Separationszonen, in deren Bereich die Abscheidematrix durch ein äußeres Magnetfeld aufmagnetisiert wird. An die Separationszone schließt sich die ebenfalls noch im Magnetfeldbereich

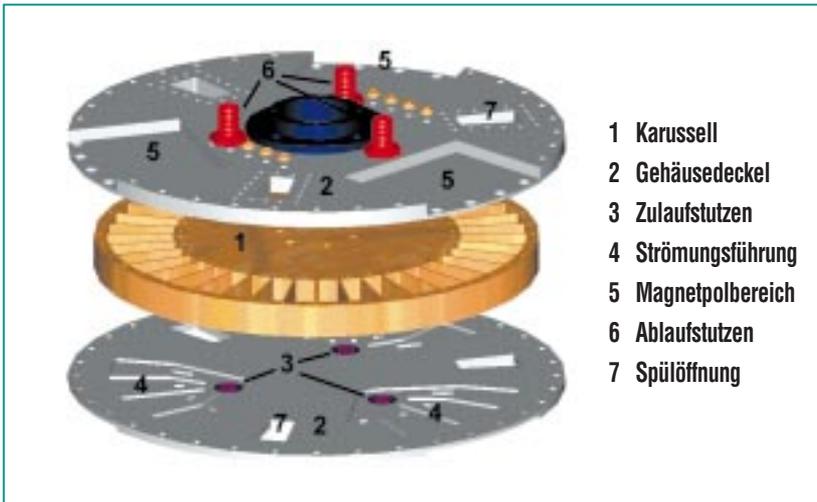
liegende Waschzone gefolgt von einer außerhalb des Magnetfelds liegenden Spülzone. Aufgrund der räumlichen Trennung der verschiedenen Zonen können die Vorgänge Abtrennung, Waschen und Ausspülen nebeneinander ablaufen, d.h. Karussell-Magnetseparatoren arbeiten mit kontinuierlichem Zulauf. Der Transport der in der Separationszone abgeschiedenen Partikel in die Wasch- und Spülzone erfolgt dabei durch die Drehung des aus Abscheidematrix und Halterung bestehenden Karussells.

Ein nach diesem Prinzip arbeitender Magnetseparator für die Erzaufbereitung wurde bereits in den siebziger Jahren durch die Humboldt Wedag AG vorgestellt [1]. Weitere Karussell-Magnetseparatoren wurden unter anderem von den Firmen Carpcó-Amax, Eriez Magnetics sowie Sala Magnetics entwickelt [2, 3], wobei sämtliche der genannten Karussell-Magnetseparatoren Elektromagnete als Magnetfeldquelle benutzen. Im Verlauf der letzten beiden Jahrzehnte verbesserte sich die Leistungsfähigkeit von Permanentmagneten jedoch stark, so dass die Verwendung dieser Magnetfeldquelle inzwischen, zumindest für kleine und mittlere Systeme, Vorteile gegenüber der Verwendung klassischer Elektromagnete verspricht. Dem Vorhaben der Entwicklung eines neuartigen Karussell-Magnetseparators lag daher die Prämisse der Verwendung von Permanentmagneten auf Seltenerd-basis zugrunde. Zusätzlich hatte sich in Vorversuchen gezeigt, dass sich die in der Abwasserbehandlung an einen Magnetsepa-

erator gestellten Anforderungen stark von denen der Erzaufbereitung unterscheiden. So liegen die geforderten Abscheidegrade in der Regel über 90%, während die verwendete Spülwassermenge nur einen Bruchteil der gereinigten Abwassermenge betragen darf. Zudem müssen die Scherkräfte innerhalb des Separators möglichst gering sein, um eine Zerstörung von z.B. Schwermetallhydroxidflocken zu verhindern.

Unter Berücksichtigung der genannten Punkte wurde in einer Kooperation der Institute für Technische Chemie (ITC) und Technische Physik (ITP) sowie der Firma Elektromagnetbau Steinert GmbH ein neuartiger Typ eines Karussell-Magnetseparators entwickelt, der sich speziell für die Abwasserreinigung bzw. Wasseraufbereitung eignet [4, 5]. Wie aus der schematischen Aufsicht (Abb. 2) zu erkennen, bildet das Herzstück des Separators ein drehbares Karussell im Innern eines geschlossenen Gehäuses. Das Karussell besteht aus einer massiven Messingscheibe von 4 cm Dicke, aus der entlang des Umfangs 40 Segmente auserdirt sind, wobei ein 3 mm dicker Steg für eine Abdichtung der einzelnen Segmente gegeneinander sorgt. Innerhalb der Segmente liegen Matrixeinsätze aus ferromagnetischen Drahtgewebe bzw. Stahlwolle, die durch oben und unten mit dem Matrixrahmen verschraubte Teflondichtungen (nicht eingezeichnet) in ihrer Position fixiert werden.

Die zu filtrierende Suspension tritt durch die drei am unteren Gehäusedeckel liegenden Zuläufe ein, verteilt sich auf die innerhalb der



- 1 Karussell
- 2 Gehäusedeckel
- 3 Zulaufstutzen
- 4 Strömungsführung
- 5 Magnetpolbereich
- 6 Ablaufstutzen
- 7 Spülöffnung

Abb. 2: Explosionszeichnung der Gehäusedeckel und des Filterkarussells eines Karussell-Magnetseparators. In die Öffnungen des Filterkarussells werden Stapel aus ferromagnetischem Filtergewebe (hier nicht eingezeichnet) eingebracht, an denen nach dem Prinzip der Hochgradienten-Magnetseparation die Partikelabscheidung stattfindet.



Abb. 3: Seitenansicht des auf Permanentmagneten basierenden Karussell-Magnetseparators KMP3.

Magnetfeldbereiche liegenden Filtersegmente des Karussells, wird durch den oberen Gehäusedeckel wieder gesammelt und tritt durch die Abläufe aus. Die Gehäusedeckel dienen dabei nicht nur der Abdichtung, sondern sie besitzen auf ihrer Innenseite spezielle Ausfräsungen, die die Strömungsführung bewirken. Um eine Optimierung des Arbeitsvolumens zu erreichen, sind die Gehäusedeckel zusätzlich an ihrer Außenseite im Bereich der Magnetpolschuhe (nicht eingezeichnet) ausgefräst. Da der zwischen den Magneten liegende Spülbereich gegenüber dem Filtrationsbereich abgedichtet ist, kann der Filtrationsvorgang während der Matrixreinigung kontinuierlich fortgesetzt werden. Abb. 3 zeigt eine Seitenansicht des fertiggestellten Prototyps, die technischen Daten sind Tab. 1 zu entnehmen.

<b>Maße des Karussell-Magnetfilters (LxBxH)</b>	≈ 800 x 800 x 1200 mm
<b>Gewicht</b>	≈ 600 kg
<b>Anzahl der Filterzonen</b>	3
<b>Flussdichte der Seltenerd-magnete im Zentrum des Arbeitsvolumens</b>	0.5 Tesla
<b>Energieprodukt des NdFeB-Werkstoffs</b>	270 – 320 kJ/m <sup>3</sup>
<b>Maße des Polschuhzwischenraums (L x B x H)</b>	150 x 62 x 102 mm
<b>Gesamtfläche der Filterzonen</b>	290 cm <sup>2</sup>
<b>Durchmesser des Karussells</b>	500 mm
<b>Energieverbrauch des Karussellantriebs</b>	40 W
<b>Filtergeschwindigkeit (bezogenen auf den Matrixquerschnitt)</b>	100 – 150 m/h
<b>Durchsatz*</b>	3 – 5 m <sup>3</sup> /h
<b>Abscheideeffizienz*</b>	75 – 95%

\*) Angaben gelten für die Separation magnetithaltiger, amorpher Fällungsprodukte. Im Falle kompakter, gut magnetischer Partikel sind wesentlich höhere Filtergeschwindigkeiten bzw. Durchsätze realisierbar.

Tab. 1: Technische Daten des Karussell-Magnetseparators KMP3

## Schwermetallentfernung

Die Abscheidung von Schwermetallionen aus Reinigungs-, Spül- oder Kreislaufwässern ist ein in verschiedenen Industriezweigen, wie z.B. Galvaniken oder Chemischen Betrieben, häufig anzutreffendes Problem. Eine zur Abschätzung der Möglichkeiten einer Magnetseparation durchgeführte Kräftebilanz zeigt, dass, im Unterschied zur Gasphase, eine direkte magnetische Beeinflussung gelöster Ionen nur sehr geringe Effekte bewirkt. Insbesondere aufgrund der durch die Brownsche Molekularbewegung hervorgerufenen Tendenz zum Konzentrationsausgleich kann auch eine lange Einwirkung starker Magnetfeldgradienten keine merkliche räumliche Separierung von Schwermetallionen erzielen. Der Anwendung magnetetechno-

logischer Separationsverfahren muss im Falle gelöster Schwermetallionen daher immer eine Prozessstufe vorausgehen, in der die Schwermetallionen in eine feste Verbindung überführt bzw. an diese gebunden werden.

Zu diesem Zweck werden die Schwermetallionen zunächst durch eine Fällung in eine feste Verbindung überführt. Als Fällungsmittel kommen dabei alle gängigen Substanzen, wie z.B. Natronlauge, Kalk oder auch Natriumsulfid in Frage. Die gebildeten Mikrofloccen werden anschließend in einer sogenannten Flockungsstufe durch die Zugabe von Flockungshilfsmitteln zu Makrofloccen verbunden. Im Unterschied zu einer gewöhnlichen Fällung werden dem Abwasser dabei zusätzlich noch magnetische Mikroartikel zugesetzt. Im Verlauf der Flockung kommt es

zu einem Einschluss der magnetischen Mikroartikel in die entstehenden Makrofloccen, was dazu führt, dass sich diese mittels Magnetseparatoren selbst bei hohen Filtergeschwindigkeiten effizient abtrennen lassen. Das gereinigte Filtrat verlässt den Separator und muss, je nach pH-Wert, vor einer Einleitung in den Vorfluter eventuell noch neutralisiert werden. Das anfallende Konzentrat wird einer weiteren Entwässerung zugeführt (Abb. 4). Optional besteht die Möglichkeit über mechanische und chemische Einwirkungen die Floccen wieder in Magnetteilchen und Schwermetallverbindungen zu separieren, die magnetischen Partikel über Trommel-Magnetseparatoren abzutrennen, zu waschen und schließlich in den Flockungsprozess zurückzuführen.

Entsprechende in der Literatur beschriebene Untersuchungen zur Schwermetallentfernung in Verbindung mit Hochgradienten-Magnetseparatoren verwendeten nahezu ausschließlich natürlichen Magnetit als Zusatzstoff [6, 7]. Der Grund hierfür ist in dem günstigen Preis und den hervorragenden magnetischen Eigenschaften von Magnetitpartikeln im Größenbereich von ca. 5–50 µm zu suchen. Diesen Vorteilen steht jedoch die geringe spezifische Oberfläche von natürlichem Magnetit gegenüber. Für eine ausreichende Wirkung müssen daher hohe Dosierungen von oftmals über 1 g/l Abwasser eingesetzt werden. Die Verwendung derart hoher Konzentrationen macht dabei für einen kommerziellen Einsatz eine effektive Magnetitrückgewinnung zwingend notwendig. Im Unter-

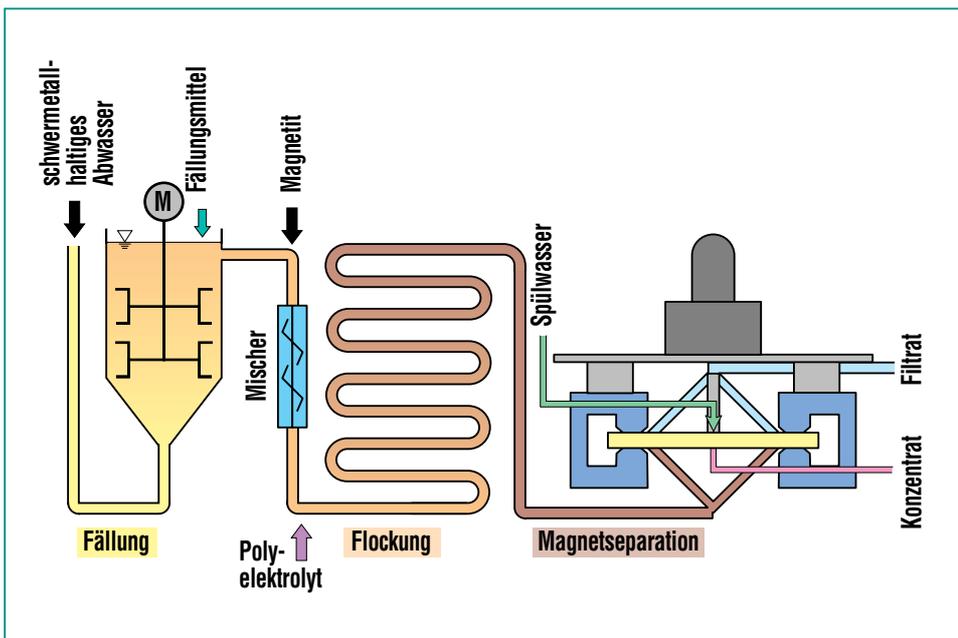


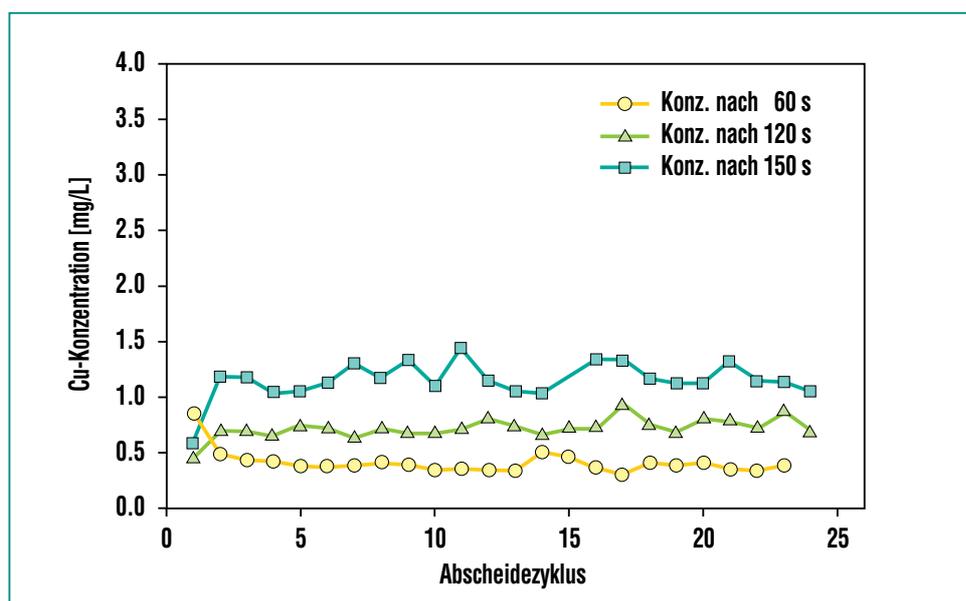
Abb. 4: Grundschemata einer Schwermetallentfernung durch Fällung/Flockung unter Zugabe magnetischer Mikroartikel und anschließende Magnetseparation.

schied zur Verwendung von natürlichem Magnetit wurden bei den eigenen Versuchen synthetisch hergestellte Magnetitpartikel mit einer mittleren Partikelgröße von nur ca. 50 nm eingesetzt. Konzentrierte Suspensionen dieser Partikel lassen sich durch ein einfaches Fällungsverfahren aus Eisen(II)- und Eisen(III)-Salzen innerhalb weniger Minuten gewinnen. Aufgrund der geringen Größe zeigen die Magnetitpartikel ein sehr gutes Suspendierverhalten und besitzen eine hohe spezifische Oberfläche. Die benötigte Zusatzmenge liegt für diese Partikel nur im Bereich von 10–20 mg/l, wodurch auf eine aufwendige Rückgewinnung verzichtet werden kann.

Die Ergebnisse von im Labormaßstab durchgeführten Vorversuchen zu diesem Ansatz einer stark verminderten Magnetitdosierung finden sich in [8]. Bei den Versuchen handelte es sich um die Messung des zeitlichen Verlaufs der Ablaufkonzentrationen einfacher, zylindrischen Hochgradienten-Magnetseparatoren, die sich im Magnetfeld eines Elektromagneten bzw. eines supraleitenden Magnetsystems befanden. Für die Frage der erzielbaren Abscheideleistung eines Hochgradienten-Magnetseparators in realen Anwendungen ist jedoch zusätzlich die Effizienz des Spülvorgangs der Abscheidematrix von entscheidender Bedeutung. Aufgrund von auch nach der Entfernung eines äußeren Magnetfelds verbleibenden Haftkräften zwischen Partikeln und Draht sowie dem Auftreten schwer zugänglicher Stellen innerhalb der starren Abscheidematrix ist die durch ei-

nen Spülvorgang erreichte Filterabreinigung nie hundertprozentig. Entscheidend ist hierbei, ob sich die verbleibenden Restbeladungen im Verlauf der Abscheidezyklen akkumulieren und damit zu immer schlechteren Abscheideergebnissen führen, oder ob sich innerhalb weniger Zyklen ein stationärer Zustand mit einer konstanten und nur geringen Restbeladung einstellt. Zur Klärung dieser Frage wurden Versuche zur Abscheidung magnetithaltiger Schwermetallhydroxidflocken an einem automatisierten, zyklisch betriebenen Laborseparator durchgeführt. Abb. 5 zeigt die gemessenen Ablaufkonzentrationen für magnetithaltiges Kupferhydroxid mit einem Cu:Fe-Verhältnis von 1:1 jeweils nach 60, 120 und 150 s jedes Abscheidezyklusses. Wie zu erkennen, stellte sich bereits ab dem

zweiten Abscheidezyklus, d.h. nach einmaligem Spülen, ein weitgehend stationäres Filterverhalten ein, das sich über den weiteren Verlauf von 24 Abscheide- und Spülzyklen nicht mehr veränderte. Ausgehend von einer Zulaufkonzentration von 50 mg/l Cu werden für Abscheidezyklen von 120 Sekunden Ablaufwerte erreicht, die deutlich unter 1 mg/l liegen, d.h. die sich im stationären Betrieb einstellende Abscheideeffizienz liegt bei über 98%. Bedingt durch die kurze Dauer der Abscheidezyklen und eine Gesamtdauer des Rückspül- und Waschvorgangs von ca. 60 Sekunden ist mit Zulaufkonzentrationen von 50 mg/l aber sicherlich bereits der Punkt erreicht, bei dem der Wechsel von einem zyklischen zu einem kontinuierlichen Separationsprozess Vorteile verspricht.



**Abb. 5: Abtrennung magnetithaltiger Kupferhydroxide mittels zyklisch betriebener HGMS. Die Messpunkte geben die Kupferkonzentration im Ablauf jeweils nach 60, 120 und 150 s jedes Abscheidezyklusses wieder. Nach einem Rückgang der Abscheideeffizienz zwischen dem ersten und zweiten Abscheidezyklus stellt sich eine konstante Ablaufqualität ein.**

## Phosphatelimination aus kommunalen Abwässern

Die Phosphatelimination aus kommunalen Abwässern ist aufgrund des Phosphatgehalts menschlicher und tierischer Ausscheidungen trotz eines nahezu vollständigen Ersatzes der Waschmittel-Phosphate nach wie vor ein aktuelles Thema. Bei einer Bilanzierung der aus verschiedenen Quellen in Gewässer eingebrachten Phosphatfrachten stellen zudem kommunale Abwässer den mit Abstand größten Anteil, weshalb auch zukünftig mit weiter verschärften Anforderungen an die Phosphat-Ablaufwerte, insbesondere auch von kleineren Kläranlagen, zu rechnen ist. Bei einer Betrachtung der Verfahren zur Phosphatelimination zeigt sich, dass der Abbau durch speziell adaptierte Mikroorganismen unbestreitbare Vor-

teile bietet, wie z.B. einen geringeren Schlammanfall und eine verminderte Aufsalzung der Gewässer. Zur Behandlung von Spitzen der Phosphatbelastung und zur Sicherstellung der Einhaltung niedriger Grenzwerte wird aber auch in Zukunft oftmals eine chemische Phosphatelimination zumindest temporär zum Einsatz kommen. Bei der chemischen Phosphatelimination lässt sich zwischen Kristallisationsverfahren bzw. Verfahren mit einem Fällungs- und Flockungsschritt unterscheiden [9]. Eine weitere Unterteilung der Fällungs/Flockungsverfahren ist nach dem Ort der Fällmittelzugabe in Bezug auf die biologische Reinigungsstufe möglich. Hier wird zwischen Vor-, Simultan- und Nachfällung unterschieden. Die Nachfällung gilt dabei als die wirksamste aber auch aufwendigste Variante, da zusätzliche Fäll- und Nachklärbecken

benötigt werden. Aufgrund des hohen Flächenbedarfs dieser Becken bestehen seit längerem Bestrebungen diese durch eine Flockenabtrennung mittels Hochgradienten-Magnetseparatoren zu ersetzen [10, 11].

Die im Rahmen von Diplomarbeiten am ITC-WGT durchgeführten Versuche zur Phosphatelimination dienten in erster Linie als Modell zum Vergleich der Leistungsfähigkeit der im Laufe der Jahre 1995 bis 1998 entwickelten Prototypen von Karussell-Magnetseparatoren [12]. Durch eine direkte Verbindung zur Kläranlage des Forschungszentrums standen die bereits für die Prototypen benötigten hohen Volumina häuslichen Abwassers jederzeit und mit einer, wenn auch im gewissen Rahmen schwankenden, bekannten Zusammensetzung zur Verfügung. Die Notwendigkeit für eine derartige Abwasserquelle wird ersichtlich wenn man bedenkt, dass z.B. mit dem Magnetseparator KMP3 für einem 24h-Versuch über 25 m<sup>3</sup> Versuchslösung benötigt werden.

Neben einer ausreichenden Fällmitteldosierung<sup>1)</sup> ( $\beta(\text{FeCl}_3) > 2$ ) erwies sich die eingesetzte Menge an synthetischem Magnetit als entscheidender Parameter für die Effizienz des Verfahrens. Wie aus Abb. 6 zu entnehmen, sind im Falle des Einsatzes von synthetischem Magnetit nur geringe Dosiermengen notwendig, um den bei der Fällung entstehenden Eisenphosphat- bzw. Eisenhydro-

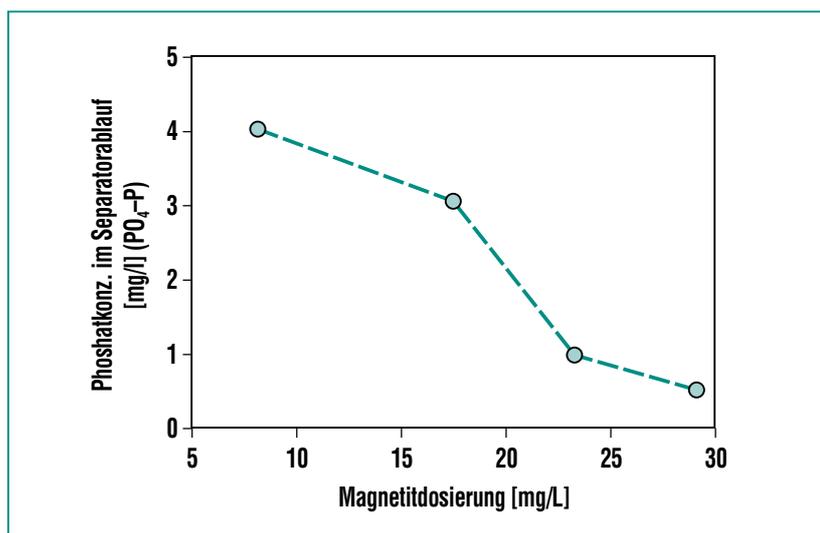


Abb. 6: Abhängigkeit der Phosphatkonzentration im Filtrat von der zudosierten Magnetitmenge für den Fall der Phosphorelimination aus kommunalen Abwässern mittels HGMS. Unter den gewählten Bedingungen ist eine Magnetitdosierung > 20 mg/l zum Erreichen von Ablaufkonzentrationen < 1 mg/l P notwendig.

<sup>1)</sup> Der  $\beta$ -Wert entspricht dabei der auf die Phosphatkonzentration im Zulauf bezogenen molaren Konzentration an zudosiertem Eisen(III)-chlorid.

xidflocken ausreichend magnetische Eigenschaften zu verleihen. Im Bereich < 30 mg/l zeigt die Dosierung dabei einen starken Effekt auf die Abscheideleistung, wobei im Falle von Zulaufkonzentrationen von ca. 10 mg/l P eine Dosierung von ca. 20 mg/l synthetischen Magnetits ausreicht, um Ablaufwerte kleiner 1 mg/l zu erreichen.

Die Leistungsfähigkeit des Prototypen KMP3 für den Anwendungsfall einer weitergehenden Phosphatelimination demonstriert Abb. 7. Die in diesem Versuch vorgelegte Phosphatkonzentration lag bei 2 mg/l P und entsprach damit in etwa dem oberen Grenzwert der im Ablauf einer biologischen Klärstufe zu erwartenden Konzentrationen. Die benötigte Fällmitteldosierung von  $\beta = 2,0$  wird durch ein Fällmitteleinsatz von ca. 20 mg/l  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  erreicht. Durch den Zusatz von 25 mg/l Magnetit wird demzufolge die in der Nachfällung anfallende Schlammmasse deutlich erhöht, was sicherlich als ein Nachteil des Magnetseparationsverfahrens anzusehen ist. Bezogen auf den gesamten Schlammanfall einer Kläranlage liegt die Erhöhung jedoch nur im Bereich weniger Prozent. Nach einer Optimierung der Betriebsparameter und aufgrund der geringeren Zulaufkonzentration konnten trotz einer erheblichen Steigerung der Filtergeschwindigkeit gegenüber den Versuchen von Abb. 6 Abscheidegrade von über 80%, entsprechend mittleren Ablaufkonzentrationen < 0,4 mg/l P, erzielt werden. Abb. 7 zeigt den zeitlichen Verlauf der gemessenen Phosphatkonzen-

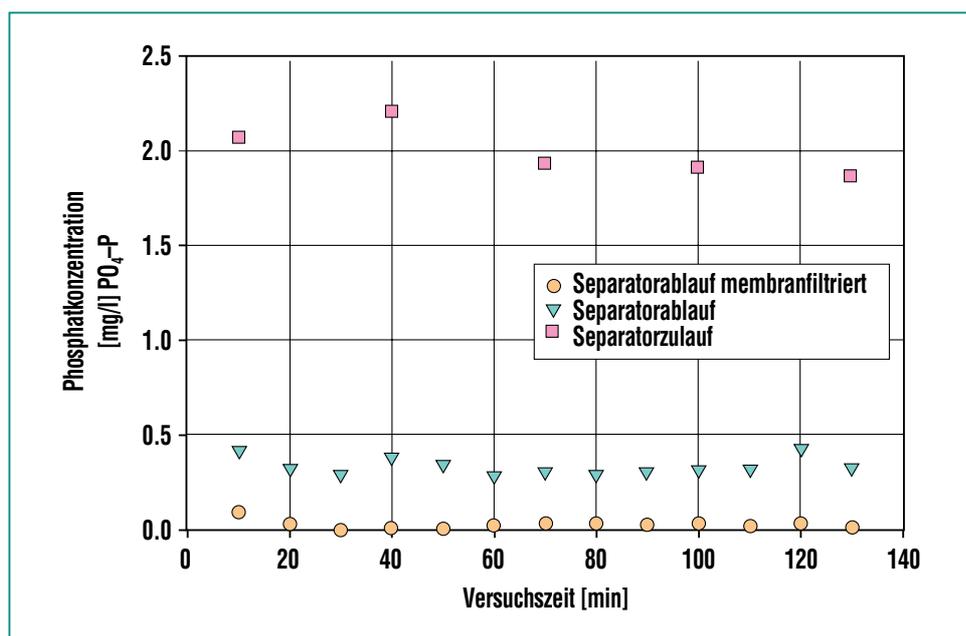
$V_{\text{spül}}$ [%]	Flußdichte [Tesla]	$C_{\text{FHM}}^*$ [mg/l]	$C_{\text{Magnetit}}$ [mg/l]	$\beta$ -Wert -	$v_0$ [m/h]
6,7	0,4	1,0	25	2,0	150
*) FHM = Flockungshilfsmittel Praestol 2510					

**Tab. 2: Betriebsparameter zur Phosphatelimination mittels des Prototypen KMP3 unter optimierten Bedingungen.**

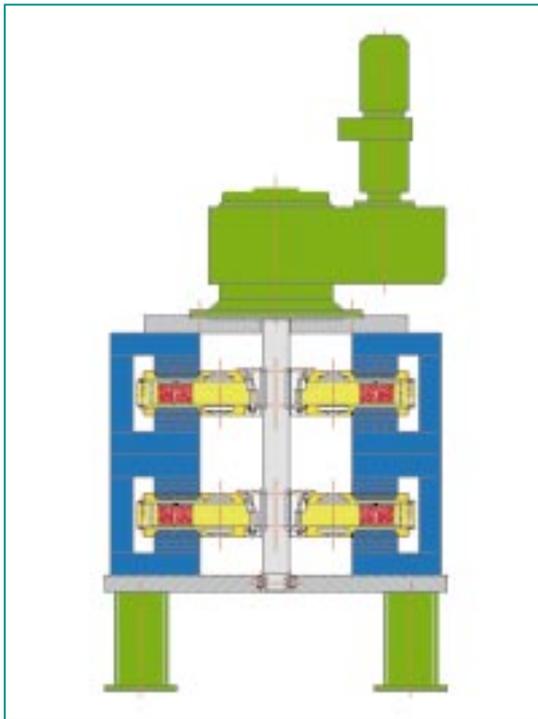
trationen im Zulauf, Ablauf und membranfiltriertem Ablauf eines entsprechenden Versuchs. Die membranfiltrierten Proben dienten dabei der Kontrolle der Güte der chemischen Fällung. In der Versuchszeit von 130 min vollführte das Karussell des Magnetseparators KMP3 mehr als vier volle Umdrehungen, d.h. jedes Filtersegment durchlief mindestens viermal den Zyklus zwischen Beladung und Spülung. Wie sich in früheren Versuchen über 24 Stunden gezeigt hatte, ist

dieser viermalige Wechsel ausreichend, um einen weitgehend stationären Betrieb des Separators und damit aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten [13].

Nachdem die Effizienz des Verfahrens der Magnetseparation zur Schwermetall- bzw. Phosphatelimination an der Pilotanlage KMP3 demonstriert werden konnte, stellt sich die Frage nach der Möglichkeit des Up-Scalings einer entsprechenden Anlage. Da der zulässige Polabstand der Perma-



**Abb. 7: Zeitlicher Verlauf der Phosphatkonzentrationen in Zu- und Ablauf des Karussell-Magnetseparators KMP3. Die ebenfalls angeführten Phosphatkonzentrationen membranfiltrierter Ablaufproben dienen der Kontrolle des Fällungsschritts. Der Versuch belegt die zeitlich konstante Ablaufqualität mit Phosphatwerten < 0,5 mg/l.**



**Abb. 8: Schematische Darstellung eines Prototypen eines Karussell-Magnetseparators mit zwei Filterkarussellen. Der Prototyp wird durch den Lizenzpartner Steinert Elektromagnetbau GmbH in Köln gefertigt.**

nentmagnete aufgrund der erforderlichen Flussdichte von ca. 0,5 Tesla weitgehend festgelegt ist, kann ein Up-Scaling nicht durch eine maßstabsgetreute Vergrößerung aller Dimensionen des Separators erfolgen, sondern lediglich die Polschuhfläche und die Anzahl der Magnete sind frei wählbar. Aufgrund der geringen Bauhöhe der aus Separatorgehäuse, Filterkarussell und Permanentmagnetsystemen bestehenden Einheiten besteht ein einfacher Weg der Durchsatzsteigerung darin, mehrere dieser Einheiten übereinander zu stapeln und durch eine gemeinsame Welle zu verbinden. Die Seitenansicht eines nach diesem Prinzip von unserem Lizenzpartner Steinert Elektromagnetbau gefertigten Karussell-Magnetseparators mit 10 – 15 m<sup>3</sup>/h Durchsatz zeigt Abb. 8.

## Zusammenfassung

Durch den Einsatz von synthetischen Magnetit-Mikropartikeln als Zusatzstoff während einer Fällung bzw. Flockung ist in zahlreichen Verfahren zur Abwasserbehandlung die Erzeugung magnetisierbarer Teilchen möglich. Im Anschluss an die Fällung erfolgt dann die magnetische Abtrennung dieser Teilchen mittels Hochgradienten-Magnetseparatoren, wobei die zulässigen Filtergeschwindigkeiten weit über denen von z.B. Sandfiltern liegen. Die Entwicklung von Hochgradienten-Magnetseparatoren auf Permanentmagnetbasis am Forschungszentrum Karlsruhe verspricht dabei die Realisierung des Verfahrens in sehr robuster Ausführung und mit niedrigen Betriebskosten.

## Literatur

- [1] W. Süsse,  
*Patent DE 2222003.7, 1973*
- [2] J.A. Oberteuffer,  
*IEEE Trans. Magn., MAG-10 (1974) S.223-238*
- [3] J. Svoboda,  
*In: Fuerstenau, D. W.: Developments in Mineral Processing 8. Amsterdam: Elsevier Sc. Publishers, 1987*
- [4] M. Franzreb, K. P Jüngst, S. H. Eberle, M. Franz ,  
*Patent DE 19626999, 1996*
- [5] M. Franzreb,  
*In: Liangzhen, L.: Proceedings of Fifteenth International Conference on Magnet Technology. Bd. 1. Beijing:, 1998, S. 751-755*
- [6] P. Anand, J.E. Etzel, F.J. Friedlaender,  
*IEEE Trans. Magn., MAG-21 (1985), Nr. 5, S. 2062-2064*
- [7] Y. Terashima, H. Ozaki, M. Sekine,  
*Wat. Res., 20 (1986), Nr. 5, S. 537-545*
- [8] M. Franzreb, P. Kampeis, M. Franz, S.H. Eberle,  
*Vom Wasser, 87 (1996), S. 235-250*
- [9] *Projekträger Wassertechnologie und Schlammbehandlung (PtWT): Herausgeber: Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, 1991*
- [10] G. Bitton, R. Mitchell, C. deLatour, E. Maxwell,  
*Wat. Res., 8 (1974), S. 107-109*
- [11] E. Krumm,  
*Umweltmagazin, Ausgabe Mai (1991), S. 36-37*
- [12] M. Franzreb, P. Kampeis, M. Franz, S.H. Eberle,  
*Acta hydrochim. hydrobiol., 26 (1998), Nr. 4, S. 213-217*
- [13] M. Franzreb,  
*Wasser, Luft und Boden, 9 (1999), S. 48-50*