



Der Betrieb von modernen Produktions- oder Chemieanlagen ist ohne automatische Steuerungen heute nicht mehr denkbar. Automatisierungssysteme können die Steuerung von einzelnen Maschinen oder ganzen Anlagen übernehmen, und einen störungsfreien Betrieb auch ohne eine dauerhafte Überwachung durch Bedienungspersonal gewährleisten.

Nun sind Kläranlagen nicht unbedingt das erste, was einem zu dem Begriff „moderne Produktionsanlage“ einfällt. Zu Unrecht, denn in modernen Kläranlagen kommen aufwändige Verfahren und neue Technologien zum Einsatz. Was vor nicht allzu langer Zeit noch einfache Klärbecken waren, die übeln Geruch verbreiteten und nur geringen Schutz vor Fischsterben und verschmutzten Flüssen boten, sind heute mehrstufig aufgebaute Anlagen, in denen die Abwässer der Städte und Fabriken mit mechanischen, biologischen und chemischen Verfahren so gründlich gereinigt werden, dass in den großen deutschen Flüssen wieder Fische leben und auch die Geruchsbelastung deutlich verbessert wurde.

Allerdings hat dieser Fortschritt seinen Preis. Mit jedem neu eingeführten Verfahren stieg auch der Energiebedarf in den kommunalen und industriellen Kläranlagen. Die neuesten Verfahren setzen statt des heute üblichen Sedimentationsbeckens moderne Membranfilter ein, um das geklärte Wasser von der suspendierten Biomasse und den noch nicht abgebauten Schmutzpartikeln abzutrennen. Auf diese Weise werden der mikrobielle Abbau und die Trennung in einer Stufe integriert. Diese Membranbioreaktoren haben eine Reihe von Vorteilen: die momentan gültigen Abwassergrenzwerte können noch einmal deutlich unterschritten werden, die Betriebssicherheit beispielsweise nach einem starken Wasseranfall durch Gewitterregen ist viel höher und die mit Membranbioreaktoren ausgestatteten Kläranlagen der Zukunft lassen sich deutlich kompakter bauen als

# Automatisierung von Membranbioreaktoren

## Modellgestützte Echtzeit-optimierung spart Energie und schont die Membranen

die bisher üblichen. Allerdings sind Energiebedarf und Investitionskosten höher, so dass die Abwasserreinigungskosten noch intensiver sind. Wenn die Technologie in Zukunft flächendeckend Fuß fassen soll, müssen die spezifischen Wasserreinigungskosten noch erheblich gesenkt werden. Um dieses Ziel zu erreichen, sind verschiedene Maßnahmen denkbar. Sie umfassen beispielsweise effektivere Membranmodule oder aber energiesparende und membranschonende Betriebsweisen. Weltweit wird in vielen Forschungsgruppen in Industrie und Universitäten an verschiedenen Maßnahmen gearbeitet, um dieser, sich noch im Versuchsstadium befindlichen Technologie den Weg in die breite Anwendung zu ebnen.

Am Lehrstuhl für Prozesstechnik, seit 2007 Teil der Aachener Verfahrenstechnik, kurz AVT, werden in enger Kooperation mit dem Lehrstuhl für Chemische Verfahrenstechnik und der Industrie seit einigen Jahren neuartige Regelungskonzepte für Kläranlagen auf der Basis der Membranbioreaktortechnologie entwickelt. Die Grundidee besteht im Einsatz eines modellgestützten Ansatzes, bei dem eine Steuerungsstrategie in Echtzeit unter Nutzung eines mathematischen Modells der Membranfiltration und der an der Kläranlage verfügbaren Messdaten durch die periodisch wiederholte numerische Lösung eines Optimierungsproblems bestimmt wird. Mit Hilfe dieser Technologie soll der Energiebedarf der neuen Generation von Kläranlagen soweit gesenkt und die Standzeit der Membranen soweit erhöht werden, dass sich diese Technologie – und die damit erreichbare Verbesserung der Wasserqualität – flächendeckend durchsetzen kann.

Bild 1 zeigt schematisch den Aufbau einer modernen Kläranlage vom Typ Membran-Bioreaktor. Ein Trockenwetterspeicher dient der Pufferung der Zulaufmenge, um tages- oder jahreszeitliche Schwankungen im Abwasseranfall einer Kläranlage abzudämpfen und um plötzlich auftretende große Ab-

wassermengen zum Beispiel nach einem starken Gewitterregen zwischenspeichern zu können. In der mechanischen Reinigung werden Feststoffverunreinigungen wie Papierfetzen, Sand, Fette, Äste oder Holzstücke mit Rechen und Sandfiltern entfernt. In der Stickstoffelimination wird das Abwasser mit Belebtschlamm vermischt. „Belebt“ verweist hier auf einen hohen Anteil an Mikroorganismen im Schlamm. In diesem Becken werden das im Abwasser enthaltene Ammonium durch die Mikroorganismen zu Nitrat, dann zu Nitrit und schließlich zu elementarem Stickstoff umgesetzt. Nitrit und Nitrat sind Nährstoffe, die zu einer Eutrophierung, das heißt zu einem übermäßigen Pflanzenwachstum und „Umkippen“ von Gewässern führen können. Im Belebungsbecken wird das Abwasser mit Sauerstoff angereichert. Dadurch werden den Mikroorganismen sehr günstige Lebensbedingungen geboten. Diese vermehren sich unter Aufnahme von weiteren Nährstoffen und Sauerstoff. Die Nährstoffe sind eben die Verschmutzungen, die als Kohlenstoffverbindungen und als Ammonium im Wasser gelöst sind. Durch das Wachstum nimmt der Schlammgehalt im Abwasser zu; ein Teil des Schlamms wird als Überschusschlamm abgezogen. Über eine Membran kann nun aus diesem Becken – und das ist der Vorteil des Membran-Bioreaktor-Verfahrens – direkt sauberes Wasser abgefiltert werden. Das Prinzip der Abtrennung des gereinigten Wassers über ein getauchtes Membranmodul ist in Bild 2 schematisch dargestellt. Man braucht beim Einsatz dieser modernen Trenntechnik keine Nachklärbecken, wie sie in konventionellen Kläranlagen notwendig sind, um den Schlamm vom gereinigten Abwasser durch Sedimentation zu trennen, sondern kann ohne weitere Behandlung und mit einer hohen Betriebssicherheit direkt sauberes Wasser abfiltrieren. Modellgestützte Regelungsverfahren werden gegenwärtig für mehrere Anwendungen an

Kläranlagen entwickelt. Eine Anwendung ist die Abfiltration von klarem Wasser aus Klärbecken mit Hilfe von Membranfiltern. Die Filtration des Abwassers mit Hilfe von Membranen ermöglicht es zwar, sehr sauberes Wasser zu produzieren. Allerdings sind Membranen nicht billig, und im täglichen Betrieb kann es zu einer Verstopfung oder Verblockung der Membranen kommen, was eine Reinigung oder ein Austauschen der Membranen erfordert.

Damit eine Membran-Bioreaktor-Anlage wirtschaftlich arbeitet, dürfen Reinigungsunterbrechungen und komplette Membranwechsel nicht zu häufig auftreten. Gängige Maßnahmen zur Entfernung von Schlamm und Schmutz sind die Membranbelüftung und die Rückspülung. Bei der Membranbelüftung wird Luft in das Becken geleitet, wodurch das Wasser in Bewegung kommt und Schmutz von der Membran abspült. Eine Rückspülung kann man sich als Rückwärtsgang für das Wasser vorstellen: Im normalen Filtrationsbetrieb fließt Wasser aus dem Belebungsbecken durch die Poren der Membran, wobei der Schmutz und Schlamm an der Membran hängen bleiben. Auf der Außenhaut der Membran sammelt sich also eine Deckschicht, die die Filtration zunehmend behindert. In regelmäßigen Abständen wird nun sauberes Wasser durch die Membran zurück ins Becken gepresst, wobei der größte Teil der Deckschicht aufgelockert und abgetragen wird.

Beide Abreinigungsmethoden sind allerdings nicht umsonst zu haben. Um Luft in das Becken mit den Membranen zu pumpen, sind Kompressoren nötig, die alleine schon 25 bis 30 Prozent der Betriebskosten einer Membran-Bioreaktor-Kläranlage verursachen. Und bei der Rückspülung geht zusätzlich sauberes Wasser verloren durch das Zurückpumpen ins Klärbecken. Beide Methoden müssen also so sparsam wie möglich, aber so intensiv wie nötig eingesetzt werden.

# in der Abwasseraufbereitung

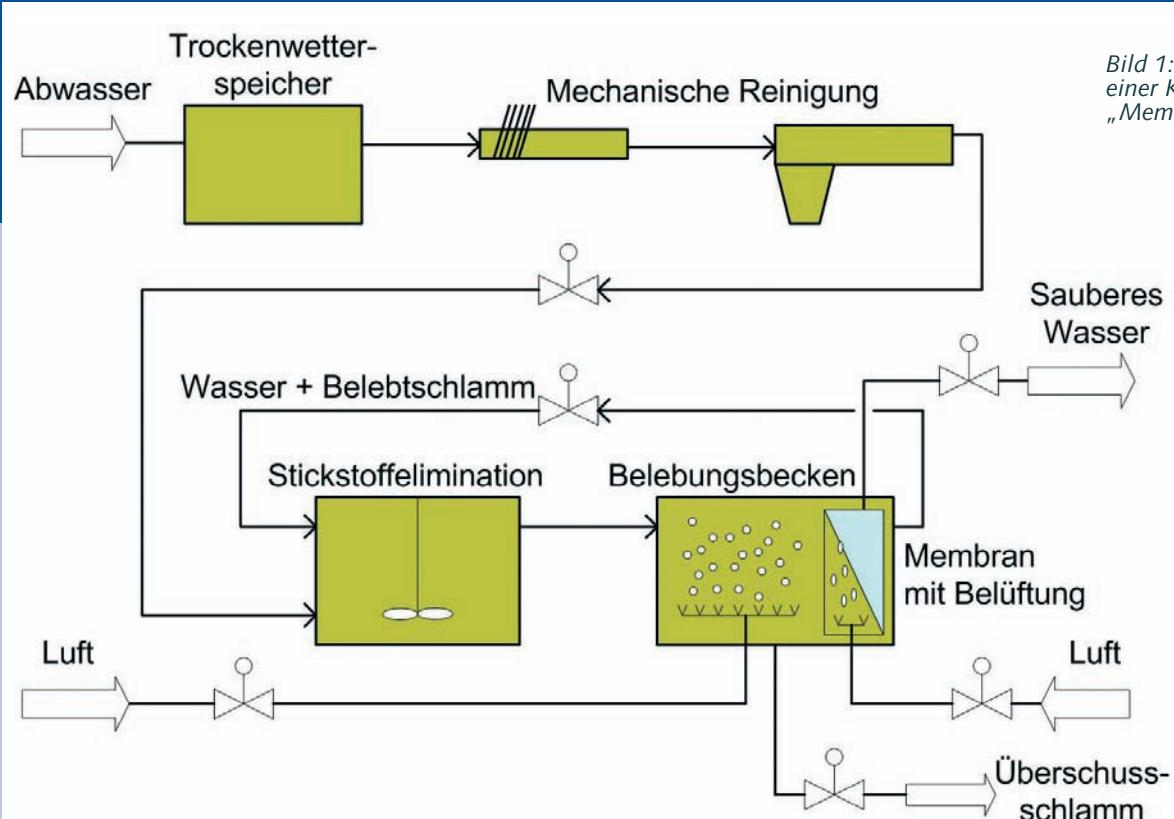


Bild 1: Vereinfachter Aufbau einer Kläranlage vom Typ „Membran-Bioreaktor“.

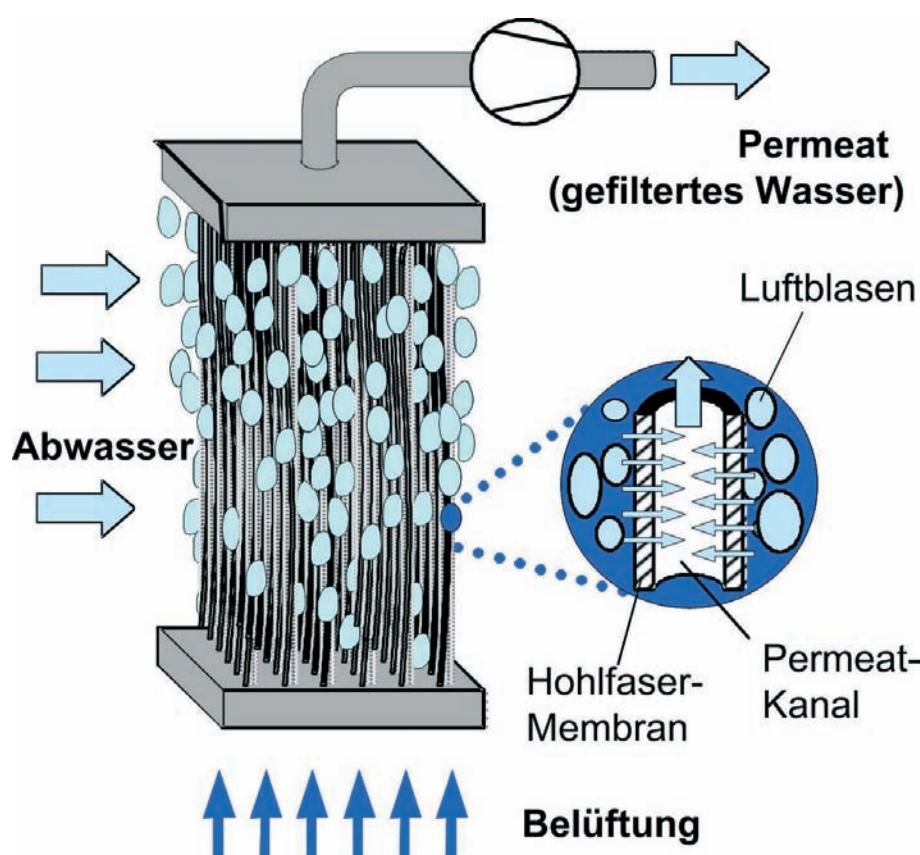


Bild 2: Ein getauchtes Membranmodul, wie es in Kläranlagen vom Typ Membran-Bioreaktor verwendet wird.  
Quelle: AVT-Chemische Verfahrenstechnik

Dies wird durch den Einsatz der modellgestützten optimalen Regelung erreicht.

Bei dem Membran-Regler des Lehrstuhls für Prozesstechnik handelt es sich um ein Softwareprogramm, das auf Kläranlagen eingesetzt werden kann, und dort die Steuerung des Filtrationsablaufes eines oder mehrerer Membranfilter übernimmt. Der Kern dieses Reglers ist das mathematische Modell, mit dem der Filtrationsvorgang interpretiert und ausgewertet wird. Die trickreiche Gestaltung dieses Modells ist Innovation des verfolgten Ansatzes: Wegen der komplizierten biologischen und strömungstechnischen Vorgänge an der Membran ist eine genaue Modellierung mit hoher Vorhersagegenauigkeit nicht möglich. Daher wird ein einfaches Modell eingesetzt, das die wesentlichen Effekte qualitativ gut beschreiben kann, ohne eine Anpassung an Messdaten aber nicht prädictiv genau ist. Dieses Modell wird laufend an die verfügbaren Messdaten angepasst. Auf diese Weise kann das Ziel der modellgestützten Regelung, die Verschmutzung der Membranen so gering wie möglich zu halten, und dennoch nicht mehr Energie als nötig für Belüftung und Rückspülung der Membranmodule aufzuwenden, erreicht werden, ohne dass eine mechanistische prädiktive Modellierung erforderlich ist. Wie wird dabei das mathematische Modell eingesetzt und an die Realität angepasst? Bild 3 zeigt den Ablauf der Rechenschritte im Membran-Regler. Zunächst werden dem Regler die Messdaten der letzten Minuten und Stunden übermittelt. Diese Messdaten zeigen, mit welchem Druck das Abwasser in dieser Zeit durch die Membran hindurchgepumpt wurde. Außerdem zeigen die Messdaten auch, wie viele Kubikmeter Abwasser dabei hindurchgepumpt wurden. Wenn man aus den Daten erkennt, dass der Druck bei gleich bleibender Abwassermenge zugenommen hat, dann bedeutet dies, dass die Verschmutzung

der Membran zugenommen hat. Diese qualitative Beobachtung muss nun quantifiziert und in den Filtrationswiderstand der Membran überetzt werden. Dazu wird ein Messdaten-Ausgleichsproblem formuliert und gelöst, bei dem die Vorhersage von Druckverlauf und Filtratanfall des einfachen Membranmodells mit den Messdaten unter Variation einiger Modellparameter abgeglichen werden. Mit dem so aktualisierten Modell kann die Zunahme der Verschmutzung in Form eines Filtrationswiderstandes als Zahl im gerade abgelaufenen Filtrationszyklus ermittelt und für den folgenden Filtrationszyklus ausreichend genau vorhergesagt werden. Bei diesem Datenausgleich werden Methoden zur Lösung von inversen Problemen genutzt, die am Lehrstuhl für Prozesstechnik für eine Vielzahl von Problemen aus Technik, Physik und Chemie entwickelt wurden.

Damit der Regler die Filtrationseinstellungen anpassen kann, muss er aber auch wissen, wie stark und wie schnell sich eine Änderung der Einstellungen Luftbegasungsmenge und Rückspülmenge auf die Verschmutzung der Membran auswirken würde. Dies wird durch ein nichtlineares Korrelationsmodell ausgedrückt, dessen Gleichungen in einem zweiten Teil des Modells gespeichert sind. Über diese Modellgleichungen berechnet der Regler durch numerische Lösung eines Optimierungsproblems, welche Einstellungen im nächsten Filtrationszyklus zu wählen sind, damit die Verschmutzung ein bestimmtes Maß nicht überschreitet.

Wie aber ist dieses Maß zu wählen? Einerseits möchte man die Membranen möglichst gar nicht verschmutzen, andererseits möchte man die Belüftung auch nicht die ganze Zeit laufen lassen und ständig sauberes Wasser zurückspülen, um die Schmutzschicht von der Membran zu entfernen. Eine mögliche Lösung wäre, für die Belüftung und Rückspülung eine feste Einstellung zu finden, die

für „normales“ Abwasser und „normalen“ Betrieb einen ausreichend guten Kompromiss zwischen Verschmutzung und Energieeinsparung bietet. Damit stünde man allerdings vor einem Problem, falls diese Einstellungen einmal nicht ausreichen und die Membran doch schneller verschmutzt als erwartet. Und falls die Einstellung zu großzügig gewählt wird, dann wird Energie verschwendet. Diese Probleme können umgangen werden, wenn der Regler selbstständig einen Kompromiss zwischen Verschmutzung und Energie finden kann.

Das ist auch genau die Methode, nach der im modellgestützten Membranregler vorgegangen wird, und für die der dritte Teil des mathematischen Modells da ist: Sowohl für die Verschmutzung als auch für die Belüftung und die Rückspülung werden Kostenfaktoren eingegeben, mit denen jede mögliche Einstellung in vergleichbare Kosten umgerechnet werden kann. Das können Euros oder Kilowattstunden sein, oder auch einheitlose Zahlen. Für die Membranverschmutzung wird eine Korrelation benutzt, mit der man aus dem erwarteten Wachstum der Schmutzschicht auf einen Belastungsfaktor umrechnen kann, der dann wiederum in einen konkreten Kostenfaktor umgerechnet wird. Diesen Kostenfaktor kann ein Anwender selber einstellen. Wird er hoch gewählt, dann bedeutet das für den Regler: „Spar nicht an der Energie, wenn Du dafür die Membran schonst und nur schwach belastest.“ Andersherum teilt eine niedrige Einstellung dem Regler mit: „Gehe sparsam mit der Energie um, und lass dafür lieber mehr Belüftung und Verschleiß der Membran zu.“

Bild 4 zeigt beispielhaft die in Experimenten erzielten Einsparungen im Sommer- und Winterbetrieb. Besonders bei niedrigem Durchfluss durch die Membranen erzielt der Membranregler deutliche Einsparungen, hier teils über 50 Prozent

Energie und über 40 Prozent Membranverschleiß. Diese Methode der Abwägung zwischen zwei gleich wichtigen Zielen ist eine Besonderheit des modellgestützten Regelungsansatzes. Im Gegensatz zu klassischen Regelungsmethoden können alle Regelgrößen und Stellgrößen kostenmäßig gewichtet und gegeneinander verglichen werden. Die Regelung erfüllt somit nicht nur die Aufgabe, einzelne Größen optimal zu steuern, sondern sie optimiert die Wirtschaftlichkeit des gesamten Prozesses. Der dargestellte Ansatz ist mit der so genannten Methode der prädiktiven Regelung zwar verwandt, erweitert aber die Grundprinzipien, da ein nichtlineares Modell verwendet wird, das zyklisch an die Messdaten angepasst wird.

<http://www.avt.rwth-aachen.de/AVT/>

Autoren:

Dr.-Ing. Jan Busch war Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der AVT-Prozesstechnik.  
Dipl.-Ing. David Elixmann ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der AVT-Prozesstechnik.  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Marquardt leitet die AVT-Prozesstechnik.

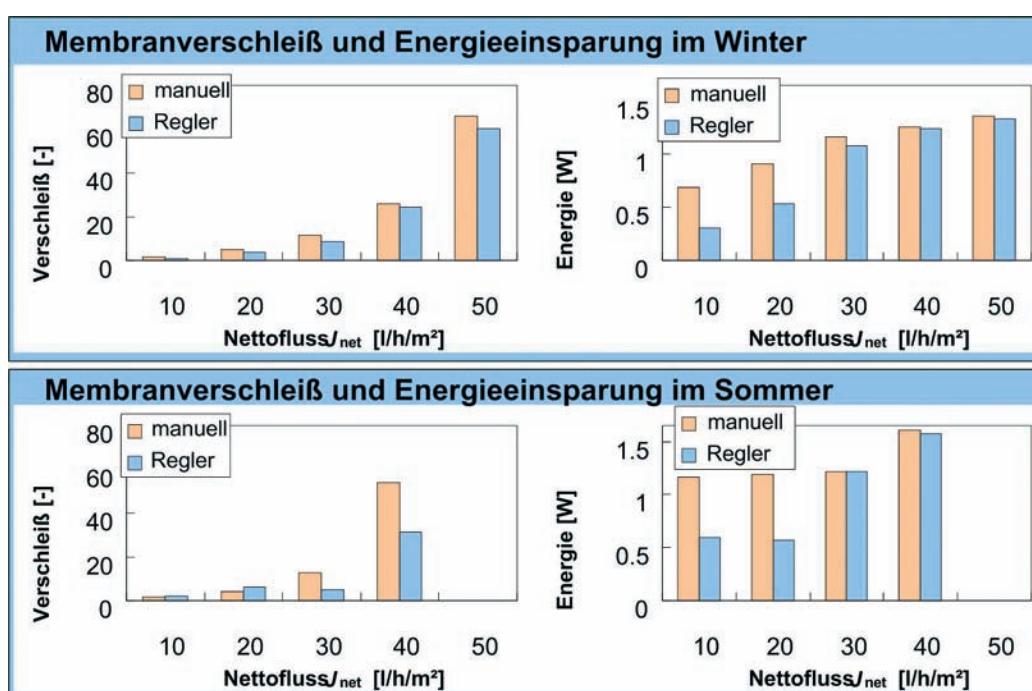
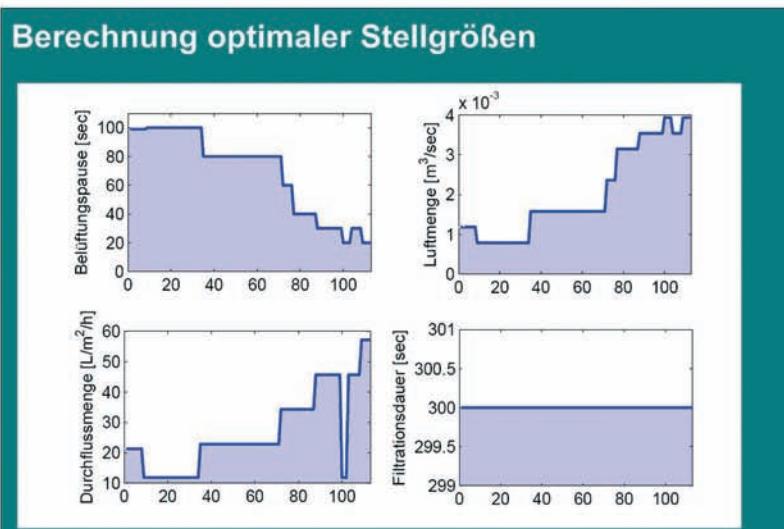
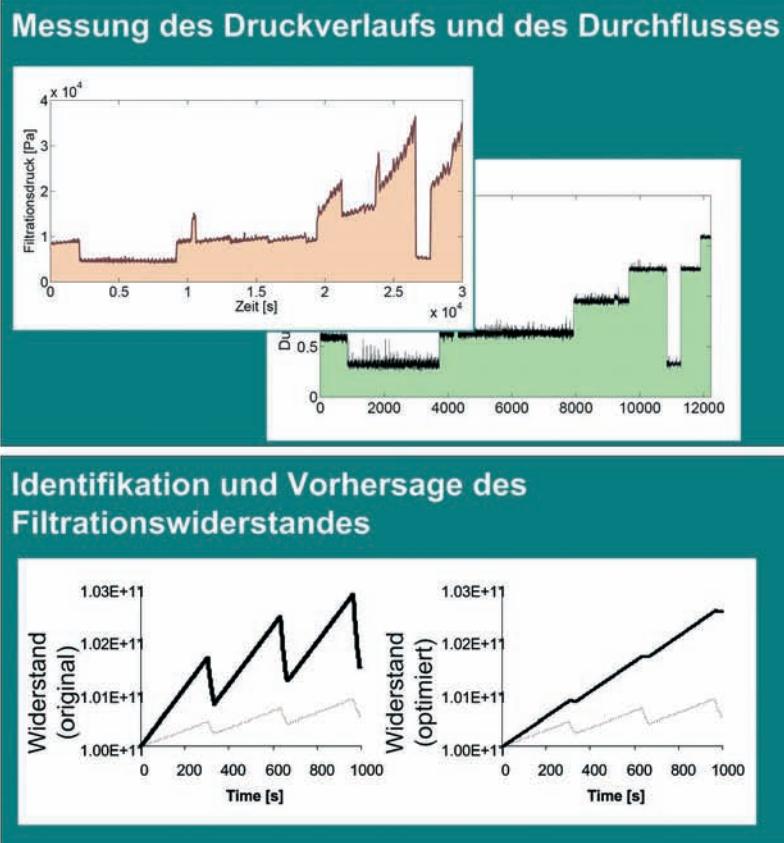


Bild 3: Ablauf des Regelalgorithmus im prädiktiven Membran-Regler.

Bild 4: Reduzierung von Membranverschleiß und Energieverbrauch durch den Membranregler, im Vergleich zum üblichen Betrieb mit von Hand eingestellten Steuergrößen. Der Nettofluss bezeichnet den Gesamt-Durchfluss durch die Membran im Filtrations- und Rückspülbetrieb. Die Energieeinsparungen bei niedrigen Durchflüssen betragen bis zu 50 Prozent. Der Verschleiß der Membranen kann vor allem bei hohen Durchflüssen um bis zu 40 Prozent reduziert werden.





Bild 5: Wissenschaftler der Aachener Verfahrenstechnik (AVT) inspiziert ein Bündel verbrauchter Hohlfaser-Membranen. Im Hintergrund ist ein Membran-Modul zu sehen, in dem Bündel von Hohlfaser-Membranen für den Einsatz in Membran-Bioreaktoren eingebaut werden.

Foto: Peter Winandy