



Zero Liquid Discharge – ein Zukunftsmodell für die Prozesstechnik zur Wasseraufbereitung?

S. Ripperger*

1. Einführung

In den letzten Jahren tauchte im Zusammenhang mit Prozessen zur Wasser- und Abwasseraufbereitung immer häufiger der Begriff „Zero Liquid Discharge (ZLD)“ auf. Im wörtlichen Sinn versteht man darunter eine Prozessführung ohne Abgabe von flüssigen Abfällen bzw. Abwässern. Seit Jahren gibt es in verschiedenen Bereichen Initiativen und Maßnahmen, um diesem Ideal näher zu kommen bzw. es zu verwirklichen. Es wurden auch bereits einige ZLD-Anlagen in Betrieb genom-

men. Die Motivation, solche Anlagen zu entwickeln und zu errichten ist vielschichtig und nicht einheitlich. Folgende Ziele können mit einer ZLD-Anlage verfolgt werden:

- Kosteneinsparung infolge eines Recyclings von Wasser und Inhaltsstoffen und ggf. auch von Energie,
- Kosteneinsparung bei der Entsorgung der über das Abwasser abgeführten Schadstofffracht (z. B. Senkung der Abwassergebühr),
- Entlastung bestehender Abwasseranlagen,
- Aufrechterhaltung der Wasserversorgung und/oder der Wasserqualität,
- Erzielung eines ökologischen Nutzens.

Vor mehr als dreißig Jahren wurden bereits Maßnahmen zur Reduzierung der Abwasserströme in vielen Betrieben einge-

leitet und umgesetzt. In der Bundesrepublik Deutschland wurde diese Entwicklung besonders mit dem Abwasserabgabengesetz vom 13. September 1976 gefördert. Seit 1981 wird eine Abwasserabgabe erhoben, die dann über mehrere Jahre stufenweise erhöht wurde. Dadurch wurden in vielen Bereichen der Wasserverbrauch und der Abwasseranfall deutlich reduziert. Meist war damit auch eine Kosteneinsparung in Form von Abwasserabgaben und Frischwassergebühren verbunden. Möglich war dies u. a. in Verbindung mit einer Wasseraufbereitung und der Schaffung interner Wasserkreisläufe. Der Abwasseranfall konnte dadurch reduziert werden, jedoch wurde die zu entsorgende Schadstofffracht im dem dann anfallenden Abwasserstrom erhöht. Die Spannweite des Wasserrecyclings reichte in vielen

* Prof. Dr.-Ing. Siegfried Ripperger
IES GmbH
Luxstr. 1
67655 Kaiserslautern
Tel.: 0177-605-1291
E-Mail: er@ie-services.eu

www.paco-online.com
www.heta.com

P A C O Gruppe Ästhetik der Präzision

Schönheit kann manchmal unsichtbar sein. Wenn ein technischer Prozess in einem Behälter perfekt abläuft, weil alle Komponenten und Funktionen zu einer optimalen Qualität des Prozesses insgesamt führen, dann ist das Ästhetik in Perfektion. Hier wird Beides sichtbar.



Mehr Informationen: Tel. +49 6663 978 - 0 Fax + 49 6663 91 91 16
PAUL GmbH & Co. P.O. Box 1220 36396 Steinau a .d. Straße Germany



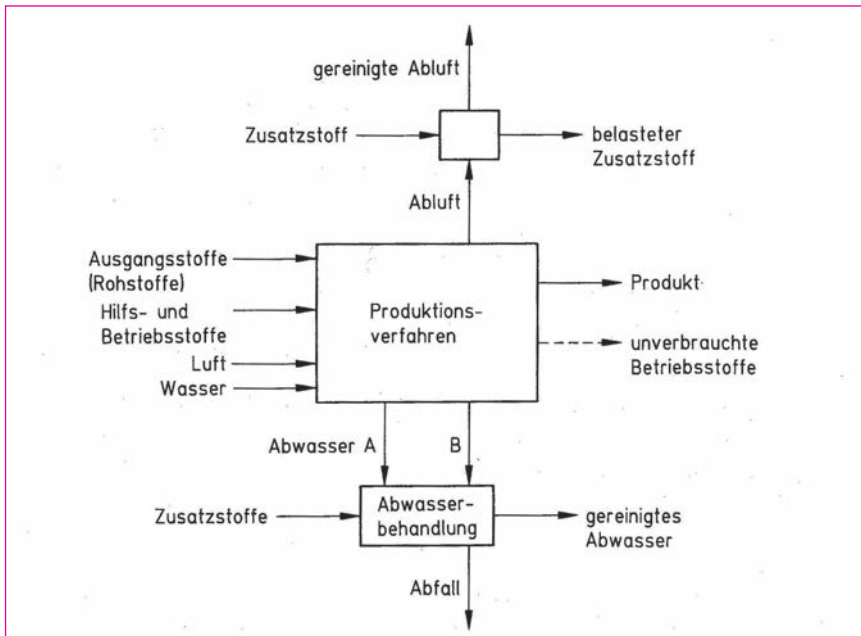


Abb. 1: Schema einer Produktion mit einer zentralen Abwasserreinigung (additive Verfahren zum Umweltschutz)

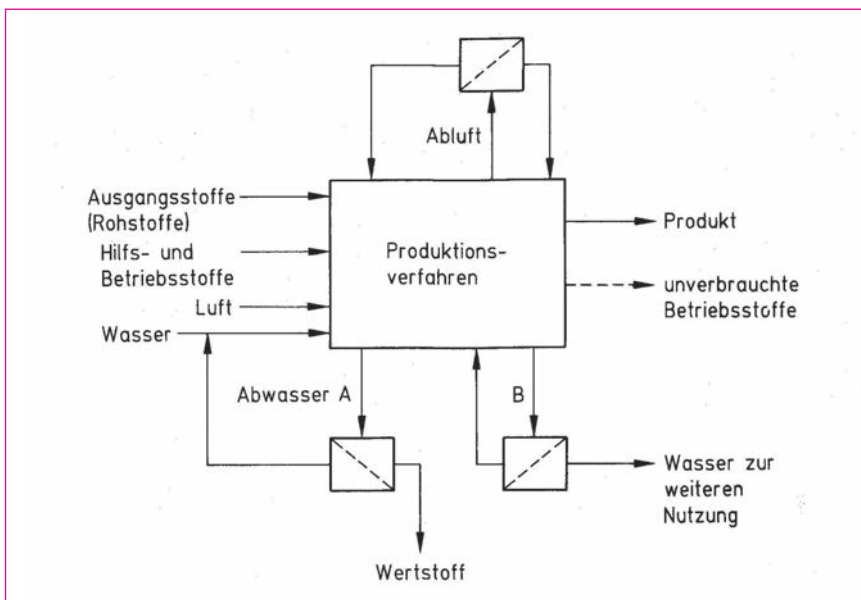


Abb. 2: Umweltschutz mit prozessintegrierten Membranverfahren

Betrieben bis zu 80 bis 90 %. Es fällt jedoch nur in wenigen Ausnahmen kein Abwasserstrom mehr an.

Die reduzierten Abwasserströme werden in zentralen Abwasserbehandlungsanlagen entsorgt, oder in separaten Anlagen weiter behandelt, so dass die Schadstofffracht weiter gesenkt wird. Meist werden nicht alle wasserfremden Stoffe abgebaut bzw. beseitigt, so dass diese mit dem reduzierten Abwasserstrom abgeleitet werden. Der verbleibende Strom enthält meist noch Salze, nichtflüchtige organische Verbindungen und kolloidale Stoffe, die als „Total Dissolved Solids (TDS)“ erfasst werden. Ein großer Anteil sind Salze, die u. a. aufgrund einer Neutralisation von sauren oder basischen Abwässern gebildet wur-

den. Auch Verschiebungen des pH-Wertes werden bei der Abwasserbehandlung vorgenommen, u. a. um Schadstoffe zu fällen und mechanisch zu separieren. So können z. B. Abwässer mit gelösten metallhaltigen Verbindungen aus der Metall- und Oberflächentechnik durch eine pH-Wertverschiebung aufbereitet werden. Die Metallverbindungen fallen als Hydroxide, Oxidhydrate oder Metallsalze aus, die mittels einer Sedimentation oder Filtration separiert und als Schlamm entsorgt werden. Die zurückbleibende wässrige Flüssigkeit wird neutralisiert. Sie kann entweder eingeleitet oder sie muss je nach Schadstofffracht weiterbehandelt werden.

Die Aufbereitung eines Abwasserstroms bis zu einem festen Rückstand ist aufgrund

der Schadstofffracht, der großen Vielfalt an Inhaltsstoffen und der notwendigen vollständigen Abtrennung der Flüssigkeit problematisch. In den 1990ziger Jahren wurden bereits Projekte durchgeführt, um Abwasserströme soweit aufzubereiten, dass kein Abwasser mehr abgegeben wird. Die Projekte wurden mit folgenden Schlagwörtern beschrieben:

- Abwasserfreies Gleitschleifen,
- Abwasserfreie Brauerei,
- Abwasserfreie Wäscherei,
- Abwasserfreies Kraftwerk
- Abwasserfreie Deponiesickerwasserbehandlung.

Wurde die Zielsetzung erreicht, so war aufgrund der hohen Salzfracht die letzte Stufe meist mit einer Eindampfung oder Verdunstung der wässrigen Phase verbunden.

Die begrenzte Verfügbarkeit von Wasser in vielen Regionen der Welt führte dazu, dass im Zusammenhang mit neu zu errichtenden Produktionsbetrieben zunehmend die Forderung nach einer ZDL-Anlage besteht. Zudem besteht in vielen Teilen der Welt die Tendenz, Grenzwerte zur Einleitung von Salzfrachten zu senken.

Eine Ursache für die zuletzt genannte Entwicklung ist u. a. der zunehmende Einsatz der Umkehrosmose zur Trinkwassergewinnung. Bei Anlagen an Meeresküsten werden 40 % bis 50 % des Zulaufs als konzentrierte Sole abgegeben. Die mit der Rückführung dieser salzhaltigen Konzentrate verbundenen Auswirkungen auf das Ökosystem in Küstennähe werden noch kontrovers diskutiert. In Regionen mit einer hohen Dichte an Umkehrosmoseanlagen ist diese Soleeinleitung bereits mit Problemen verbunden. Ein negativer Einfluss auf die technischen Anlagen anderer Meerwassernutzer in ihrer Nähe kann oft nachgewiesen werden.

Bei Entsalzungsanlagen im Inland sind die mit der Abgabe der Konzentrate verbundenen Probleme meist um ein Vielfaches größer. Die Konzentrate sind Abwasser, dessen Abgabe in der Regel stark reguliert und ggf. mit Gebühren belastet ist. Oft möchte man auch nachgeschaltete biologische Kläranlagen und andere öffentliche Gewässer von der Salzfracht entlasten. In diesem Zusammenhang werden unter dem Begriff „Zero Liquid Discharge (ZLD)“ Konzepte einer abwasserfreien Wasser- bzw. Abwasserhandlung entwickelt. In einigen Fällen ist man dabei auch bestrebt Inhaltsstoffe (z. B. Natriumchlorid, Natriumsulfat, Phosphor) aus dem Abwasser zu gewinnen. So kann die Konzentrierung des Meerwassers infolge der Trinkwassergewinnung mittels Umkehrosmose auch als ein erster Schritt



zur Gewinnung der darin gelösten anorganischen Stoffe aufgefasst werden. Dabei müssen u.a. die oft noch vorhandenen organischen Inhaltsstoffe aus dem Wasser entfernt werden, was wiederum einige Aufbereitungsstufen erfordert.

2. Mögliche Konzepte für ZLD-Prozesse

2.1 Anforderungen an die Prozessstufen

Eine wichtige Voraussetzung für ein wirtschaftliches Wasserrecycling ist, dass die in einem Betrieb anfallenden Abwasserströme möglichst nicht miteinander vermischt und in zentralen Reinigungsstufen durch die Zufuhr weiterer Stoffe aufgearbeitet werden. Zusatzstoffe zur Abtrennung bzw. zum Abbau von Schadstoffen sind z. B. Adsorptionsmittel, Bakterienkulturen zur biologischen Reinigung, Fällungs- und Flockungsmittel oder Filterhilfsmittel zur Anschwemmfiltration. Die Vermischung und die zusätzliche Stoffzufuhr, wie in Abb. 1 dargestellt, ist im Zusammenhang mit zentralen Abwasserbehandlungsanlagen noch üblich. Sie verhindern jedoch

eine wirtschaftliche Aufarbeitung der Reststoffe und ihre weitere Verwendung und erhöhen die zu deponierende Reststoffmenge. Günstiger ist es auch kleine Abwasserströme am Ort der Entstehung, d. h. vor der Vermischung mit anderen Stoffströmen, aufzuarbeiten (Abb. 2). Oft können dadurch auch einzelne Inhaltsstoffe einer weiteren Nutzung zugeführt werden. An die Aufbereitungsverfahren werden folgende Anforderungen gestellt:

- eine selektive Stofftrennung ohne Zusatzstoffe,
- ein physikalisches Trennprinzip ohne Veränderung der zu trennenden Komponenten,
- eine kontinuierliche und automatische Betriebsweise,
- ein wirtschaftlicher Betrieb auch bei kleinen Anlagegrößen und
- eine einfache Integration in die Produktionsprozesse.

2.2 Einsatz von Membranverfahren

Die Verfahren zur Stofftrennung mit Membranen erfüllen weitgehend das oben beschriebene Anforderungsprofil. Sie werden daher häufig zur prozessintegrier-

ten Aufbereitung von Abwasserströmen eingesetzt. Wegen der geforderten kontinuierlichen Betriebsweise werden die Membranverfahren hauptsächlich als dynamische Verfahren mit überströmten Membranen betrieben. Je nach Anforderungen ist zur Aufbereitung des recycelten Wassers ein ein- oder mehrstufiger Prozess notwendig.

Mikro- und Ultrafiltration

Partikuläre- und makromolekulare Stoffe werden mittels der Mikro- und Ultrafiltration abgetrennt und konzentriert. Das dabei anfallende Permeat ist weitgehend frei von Mikroorganismen, so dass es bereits im Prozess wieder verwendet oder zu weiteren Aufbereitung einer Nanofiltration oder Umkehrosmose zugeführt werden kann.

Umkehrosmose

Mittels einer Umkehrosmose werden gelöste Inhaltsstoffe, z. B. Salze, einer wässrigen Lösung weiter konzentriert. Dabei stellt der mit den Inhaltsstoffen ansteigende osmotische Druck in Verbindung mit der Druck-Belastbarkeit der Membranmodule und der Anlage eine obere Begrenzung dar. Üblicherweise wird

MATH

2 MARKET

INNOVATION IN FILTRATION

Modellierung und Simulation von Filtrationsprozessen, Filterelementen und Filtermedien.

Software und Beratung

Math2Market GmbH
Stiftsplatz 5
67655 Kaiserslautern, Deutschland
www.math2market.de

Innovation. Präzision. Zuverlässigkeit.

Metalldrahtgewebe von Weisse & Eschrich

Die Lösung für Ihre Filtration

Weisse & Eschrich

Drahtgewebefabriken

Weisse & Eschrich GmbH & Co. KG • D-96337 Ludwigsstadt
Telefon 0 92 63/9 46-0 • info@weisse.de • www.weisse.de

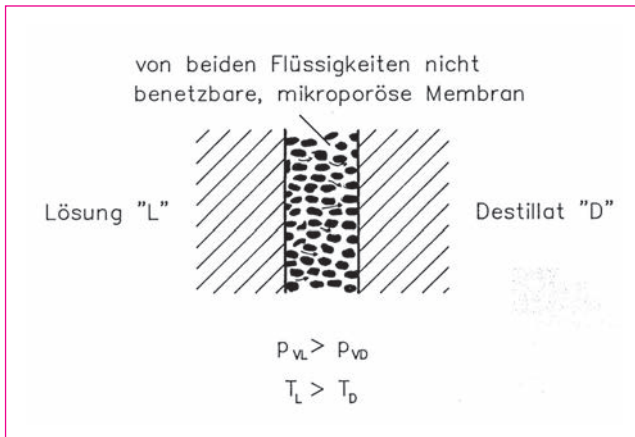


Abb. 3: Schema zur Transmembrandestillation (TMD) mit einem direkten Kontakt der Lösung und des Destillates mit der Membran

zur Wassergewinnung aus Meerwasser die Umkehrosmose bis zu einem Druck von < 80 bar angewendet, wobei im Konzentrat mit Bezug auf NaCl ein Salzgehalt von bis zu 80 g/L erreicht wird. Zur Deponiesickerwasseraufbereitung wurden Umkehrosmoseanlagen mit möglichem Betriebsdruck von 150 bar entwickelt. Pilotanlagen wurden auch bereits bei 200 bar betrieben. Mit entsprechenden Hochdruckanlagen wurde das zu behandelnde Konzentrat deutlich reduziert, was auch mit wesentlich reduzierten Invest- und Betriebskosten zur weiteren Behandlung verbunden ist.

Die abgetrennten Stoffe sind in dem sogenannten Konzentrat überwiegend in gelöster oder kolloidaler Form enthalten. Für die Weiterbehandlung des Konzentrates ist es günstig, dass die schädlichen Inhaltsstoffe im Abwasserstrom in einer möglichst hohen Konzentration bzw. in einem möglichst kleinen Volumenstrom abgeführt werden.

Transmembrandestillation

Zur Weiterbehandlung von Konzentraten einer Umkehrosmoseanlage bietet sich die Transmembrandestillation (TMD) an. Es handelt sich dabei auch um ein Membranverfahren, das zur Entsalzung und Reinigung von Wasser und wässrigen Lösungen sowie zum Konzentrieren nicht flüchtiger Wasserinhaltsstoffe eingesetzt werden kann. Bei ihr werden zwei wässrige Phasen (Konzentrat und Destillat) durch eine hydrophobe mikroporöse Membran voneinander getrennt (Abb. 3). Die hydrophobe Membraneigenschaft bewirkt in Verbindung mit der geringen Porengröße, dass eine wässrige Phase erst beim Überschreiten des kapillaren Eindringdruckes bzw. Benetzungsdruckes in das Porensystem eindringen kann. Viele handelsübliche hydrophobe mikroporöse Membranen weisen Benetzungsdrücke für Wasser im Bereich von 2 bis 4 bar auf. Aufgrund dieser Membraneigenschaft

kann auch bei einem direkten beidseitigen Flüssigkeitskontakt der Membran eine sichere Trennung von Konzentrat und Destillat erreicht werden. Beide sind über die gasgefüllte Porensystem in der Membran voneinander getrennt.

Die treibende Kraft für den Stofftransport durch die Membran ist eine Dampfdruckdifferenz zwischen den Phasengrenzflächen, die sich an den Porenöffnungen der Membran ausbilden. Eine Dampfdruckdifferenz kann u. a. durch eine Temperaturdifferenz eingestellt werden. Dabei wird Flüssigkeit an der warmen Seite der Membran verdunstet, als Dampf durch die Membran permeieren und auf der kalten Seite kondensieren.

Ein direkter beidseitiger Flüssigkeitskontakt der Membran kann einfach mit hydrophoben mikroporösen Kapillarmembranen realisiert werden. In diesem Fall kann auch das günstige Gegenstromprinzip einfach angewendet werden. Auch mit Flachmembranen kann in Form von speziellen Wickelmodulen eine Transmembrandestillation verwirklicht werden.

Mit der Kombination eines TMD-Moduls und eines Wärmetauschers kann im Hinblick auf die Wärmenutzung auch der Effekt einer mehrstufigen Verdampfung erreicht werden. Ein zugehöriges Fließschema einer Anlage zeigt Abb. 4. Die dem Destillat in Form von Kondensationswärme zugeführte Energie wird dabei in einem Wärmetauscher wieder teilweise an die Lösung übertragen. Die Festlegung des Betriebsbereiches einer TMD-Anlage mit Wärmerückgewinnung wird auf Basis einer Kostenoptimierung vorgenommen.

Die Funktionstüchtigkeit der Transmembrandestillation wurde von vielen Forschern nachgewiesen. Neueste Ergebnisse sind in den Dissertationen von Nikolaus /1/ und Winter /2/ enthalten. Die großtechnische Einführung der Transmembrandestillation zur Bereitung

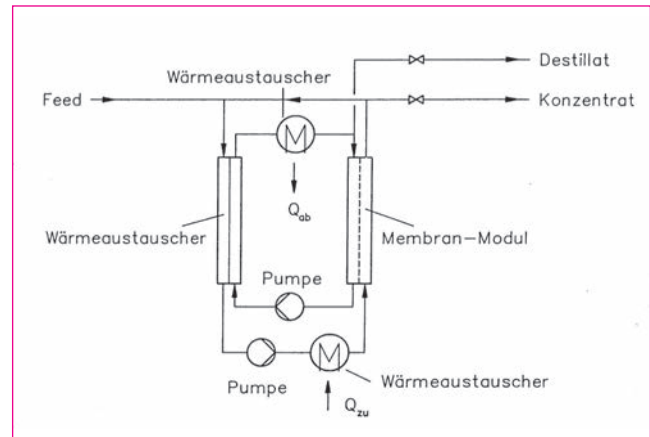


Abb. 4: Fließschema einer Anlage zur Transmembrandestillation mit Wärmerückgewinnung

von Trinkwasser aus Meerwasser scheidete bisher hauptsächlich an den im Vergleich zur Umkehrosmose höheren Betriebs- und Investitionskosten. Bei den Betriebskosten schlagen sich insbesondere die Kosten für die Bereitstellung der Energie zur Verdunstung der Flüssigkeit zu Buche.

Versuchsergebnisse zeigen, dass auch bei der Konzentrierung einer Salzlösung ein Destillat mit einer sehr geringen Leitfähigkeit erzeugt werden kann (siehe z. B. Abb. 5). Dieser Wert ist gegenüber normalen Eindampfanlagen sehr gering, da durch die Membranen eine Salzübertragung durch sehr kleine mitgerissene Tröpfchen vermieden wird. Zu beachten ist, dass die Leitfähigkeit des Destillates durch übertretendes CO₂ oder andere flüchtige Bestandteile beeinflusst werden kann. Es ist daher zur Erzeugung eines Wassers mit niedriger Leitfähigkeit für eine Vakuumentgasung vor der TMD-Stufe zu sorgen. Auch hierfür werden hydrophobe Membranen bereits standardmäßig eingesetzt. Wässrige Lösungen mit Salzen und Säuren können mit der Transmembrandestillation konzentriert werden. Es wurde auch experimentell gezeigt, dass wässrige Lösungen mit einem geringen Gehalt an flüchtigen organischen Komponenten behandelt werden können, ohne dass eine Membranbenetzung auftritt. Da oftmals Wassermangel und reichlich Sonneneinstrahlung regional zusammen treffen, und die Transmembrandestillation auch bei Wassertemperaturen von 50 bis 98°C noch effektiv betrieben wird, kann sie auch in Verbindung mit einer solarthermischen Anlage betrieben werden. Die TMD bietet sich insbesondere zur weiteren Behandlung der Konzentrate einer mit Meerwasser betriebenen Umkehrosmoseanlage an. Da zum Betrieb einer TMD-Anlage sehr wenig Energie für Pumpen erforderlich ist, können auf Basis von Photovoltaik und Sonnenkollektoren auch energieautarke Anlagen errichtet



werden. Es wurden auch erste erfolgversprechende Versuche unternommen, die Transmembrandestillation zur Verdampfungskristallisation anzuwenden.

Die Verdampfung (Eindampfung) ist oft das konkurrierende Verfahren zur TMD. Ein exakter Kostenvergleich beider Verfahren kann nur anhand konkreter Projekte durchgeführt werden, da häufig die Kosten wesentlich von projektbezogenen Randbedingungen beeinflusst werden. Dies trifft u.a. auch auf die Wahl der Werkstoffe zu. TMD-Anlagen bestehen hauptsächlich aus Kunststoffen, was im Fall von korrosiven Lösungen vorteilhaft ist. In der Regel sind daher bei kleinen und mittelgroßen Anlagen die Investitionskosten von TMD-Anlagen wesentlich niedriger als bei konventionellen Eindampfanlagen mit gleichem Performance-Faktor.

2.3 Behandlung von Konzentraten

Zur Behandlung der Konzentrate, die bei den zuvor genannten Verfahren anfallen, sind weitere Prozessstufen erforderlich. Leichtflüchtige Stoffe können durch Strippen und einer nachfolgenden Kondensation der flüchtigen Stoffe entfernt werden. Oxidierbare und biologisch

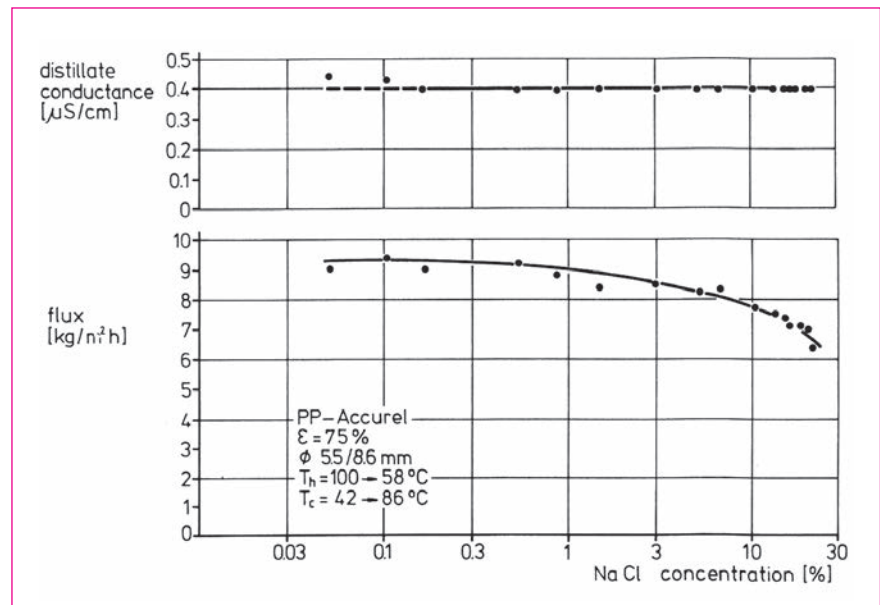


Abb. 5: Versuchsergebnisse einer Transmembrandestillation mit mikroporösen Polypropylen-Rohrmembranen zur Konzentrierung einer Kochsalzlösung 1/3/

abbaubare Stoffe können in einer entsprechenden Behandlungsstufe teilweise abgebaut werden.

Abwasserfrei bedeutet, dass die zum Teil gelösten Inhaltsstoffe des Abwassers, zumeist Salze, in fester Form anfallen

müssen und ein wiederverwertbares „reines“ Wasser abgegeben werden kann. Wie bereits erwähnt, kann diese Anforderung mit einer Verdampfung bzw. Verdunstung der restlichen Flüssigkeit erreicht werden. Inhaltsstoffe des Konzentrates kön-

KIK Kunststofftechnik

Innovative Lösungen mit Porösen Sinterwerkstoffen
[PE, PP, PTFE und Edelstahl]

- Filtrieren
- Adsorbieren
- Fluidisieren
- Begasen
- Schalldämpfen
- Speichern
- Dosieren

KIK Kunststofftechnik
Saarbrücker Straße 128 Fon: 0049 6805/90 80 0
66271 Kleinblittersdorf Fax: 0049 6805/90 80 -21

www.kik-por.de kik@kik-por.de

Kanalabscheider
Putzt Fettnebel und Feuerteufel weg!

- bessere Prozesshygiene
- ölfreie Maschinen
- saubere Abluftkanäle
- geruchsfreie Fortluft
- selbstreinigende CYCLONE®-Abscheider
- hoher Brandschutz
- alles aus Edelstahl

REVEN® X-CYCLONE®

Innovationspreis 2013

Tel.: +49 (0) 7042 - 373 - 0 www.reven.de/fettnebel

nen zuvor durch eine Fällung oder Kristallisation und eine nachgeschaltete Zentrifugation oder Filtration als Feststoffe abgeschieden werden. Das anfallende Sediment bzw. der anfallende Filterkuchen kann getrocknet werden, so dass nur ein Feststoff anfällt. So werden z. B. die Feststoffe aus kleinen Abwasserströmen mittels eines kontinuierlich oder taktweise betriebenen Bandfilters abgeschieden, auf denen der Rückstand danach auf dem Band getrocknet und abgeführt wird.

Bei kleinen Abfallmengen kann eine solare Trocknung angewendet werden. Größere Mengen werden unter Energieeinsatz in Anlagen getrocknet. Der Energiebedarf beim Trocknen kann den größten Energieanteil am Gesamtprozess ausmachen. Bei großen Trocknungsanlagen, wie sie z. B. in der Papiertechnik betrieben werden, wird zunehmend ein stärkeres Augenmerk auf eine Energierückgewinnung gelegt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der größte Anteil der bei der Trocknung abgeführten Energie als latente Energie mit dem Wasserdampf abgeführt wird. Um eine größtmögliche Wärmerückgewinnung zu realisieren ist es notwendig einen Teil des Wasserdampfes zu kondensieren. Um Wärme auf einem möglichst hohen und damit wertvollem Temperaturniveau zu gewinnen, muss die Kondensation auf einem möglichst hohen Temperaturniveau stattfinden. Ein entsprechend hoher Taupunkt wird erreicht, wenn aus dem Trockner ein nahezu mit Wasserdampf gesättigter Luftstrom abgeführt wird. Bei der Trocknung fällt ein trockener Rückstand an, der z. B. Salze und sonstige nicht flüchtige Inhaltsstoffe des Abwassers enthält.

In Gebieten mit einer hohen Sonneneinstrahlung und wenig Niederschlag kann die Eindampfung bzw. Wasserverdunstung auch mit Becken realisiert werden, die entsprechend den Becken zur Meersalzgewinnung betrieben werden. Entsprechende Anlagen zur Abwassereindampfung sind bisher in Europa nicht bekannt. Sie dürften auch unter Berücksichtigung der bei uns geltenden umwelttechnischen Vorschriften schwer zu realisieren sein. Anders ist die Situation z. B. in Afrika oder Amerika, wo sogenannte Ponds auch zur Abwasser-

behandlung angelegt werden. Zur Behandlung von Konzentraten stehen auch verschiedene Verdampferbauarten zur Verfügung. Da es sich meist um eine Kristallisationsverdampfung handelt, ist es günstig die sich bildenden Kristalle z. B. mittels Zentrifugation simultan in einem Seitenstrom abzutrennen und konzentriert abzuführen. Die eigentliche Eindampfung wird dabei mit einer relativ geringen Feststoffkonzentration betrieben.

Eine Alternative zu der Arbeitsweise mit einer Ausschleusung von gebildeten Kristallen sind die sogenannten Dünnschichtverdampfer mit bewegten Wischern. Bei ihnen werden die sich an der beheizten Verdampferwand bildenden Kristalle abgestreift und ausgetragen. Nach einer kurzen Nachdampfung kann auf diese Art ein pulverartiger Feststoff gewonnen werden.

Um den Energiebedarf bei einer Eindampfung zu reduzieren, wird diese meist mehrstufig ausgeführt, d. h. die Brüden der ersten Stufe werden als Heizdampf zur Verdampfung in der zweiten Stufe genutzt. Mit jeder zusätzlichen Stufe wird der Energiebedarf reduziert, jedoch steigen die Investitionskosten, so dass die optimale Stufenzahl auf Basis einer Wirtschaftlichkeitsberechnung ermittelt werden kann. Dabei werden die Gesamtkosten durch einen Vergleich der Investitions- und Energiekosten minimiert. Bei der Behandlung von Konzentraten bilden drei- oder vierstufige Verdampferanlagen oft das Optimum ab.

Eine Alternative zur Eindampfung konzentrierter Abwasserströme ist die Eindüsung in eine mit vorgewärmter Luft betriebene Wirbelschicht. Parallel zur Trocknung wird dabei auch eine Granulierung des Feststoffes erreicht.

Im Fall von Abwasserströmen mit einem zusätzlichen hohen Anteil an organischen Verbindungen bietet sich die Abfallverbrennung, d. h. die Eindüsung in eine Flamme, an. Meist wird die Abwasserverbrennung mit bestehenden Verbrennungsprozessen kombiniert. Die nichtverbrennbaren Inhaltsstoffe werden dabei mit der Asche abgeführt und entsorgt. Ein Teil wird auch als Staub abgeführt und an den nachgeschalteten Oberflächenfiltern abgeschieden.

Auch Anwendungen, bei denen ein Konzentrat dem heißen Rauchgasstrom einer Verbrennungsanlage eingedüst und getrocknet wird, sind denkbar. Dabei wird das Rauchgas gleichzeitig gekühlt und der Feststoff als Staub im Rauchgasfilter abgeschieden.

3. Schlussbemerkungen

Bei ZLD-Anlagen muss bei der Konzeption und der Materialauswahl sowohl die korrosive Wirkung der Inhaltsstoffe des Abwassers als auch ihre Neigung zur Krustenbildung beachtet werden. In Kombination mit den mechanischen Beanspruchungen kann der Betrieb der Anlagen mit deutlichen Verschleißerscheinungen verbunden sein. Diese können je nach Betriebsbedingungen oft nur durch hochwertige Werkstoffkombination minimiert werden. Durch den Einsatz von Abwärme auf einem relativ niedrigen Temperaturniveau können die Betriebskosten und, durch den möglichen Einsatz von beständigen Kunststoffen, auch die Investitionskosten minimiert werden.

Die große Vielfalt der zu behandelnden Abwässer erfordert es, den jeweiligen Prozess den spezifischen Anforderungen und lokalen Gegebenheiten anzupassen.

Generell kann festgestellt werden, dass ZLD-Prozesse auf Basis bekannter Verfahren und Anlagen zur Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung errichtet werden können. Durch eine Integration der Wasserbehandlung in bestehende Prozesse sind im Verbund mit einer weitergehenden Wärmenutzung wirtschaftliche Lösungen möglich. Die Technologie wird jedoch nur angewendet, wenn ihre Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu den alternativen Lösungen, besonders zur Entsorgung der Konzentrate, eindeutig gegeben ist.

Literatur:

- /1/ K. Nikolaus: Trink- und Reinstwassergewinnung mittels Membrandestillation. Dissertation TU Kaiserslautern (2013), Fortschritt-Berichte des Lehrstuhls für Mechanische Verfahrenstechnik, Bd. 10, ISBN 978-3-943995-49-7
- /2/ D. Winter: Membrane Distillation. Dissertation TU Kaiserslautern (2014), Schriftenreihe der Reiner Lemoine-Stiftung, Shaker Verlag, ISBN 978-3-84403706-7
- /3/ K. Schneider, W. Hölz, R. Wollbeck, S. Ripperger: Membranes and Moduls for Transmembrane Distillation. Journal of Membrane Science 39 (1988), S. 25 - 42