

Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

Band: 53 (1975)

Heft: 7

Artikel: Wasseraufbereitung durch umgekehrte Osmose = Traitement de l'eau par osmose inverse

Autor: Wüthrich, Max / Mauch, Hans

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-875606>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 15.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Wasseraufbereitung durch umgekehrte Osmose

Traitement de l'eau par osmose inverse

Max WÜTHRICH und Hans MAUCH, Bern

532.71:628.161

Zusammenfassung. Einleitend werden die Begriffe «Osmose» und «umgekehrte Osmose» erläutert, worauf einige theoretische Grundlagen folgen. Anschliessend werden die Voraussetzungen für die technische Durchführung der Umkehrosmose erwähnt. Es wird dann die für unsere Versuche mit dem Hohlfasermodule verwendete Einrichtung beschrieben. Die Versuche gaben Aufschluss über Menge und Qualität des produzierten Wassers unter verschiedenen Bedingungen. Die Versuchsergebnisse, die meist Mittelwerte aus mehreren Messungen darstellen, sind in Tabellen zusammengestellt und ergeben ein klares Bild von den mit Wasser aus dem Stadtberner Leitungsnetz erzielbaren Wasserqualitäten. Das durch Umkehrosmose erzeugte Wasser kann für die wichtigsten Bedürfnisse der PTT-Betriebe an Reinwasser verwendet werden.

Résumé. Après avoir expliqué les notions d'osmose et d'osmose inverse, les auteurs exposent quelques principes fondamentaux. Ils évoquent ensuite les conditions techniques nécessaires à la réalisation de l'osmose inverse. L'installation d'essai équipée d'un module à fibres creuses est décrite. Les essais visaient à établir la quantité et la qualité de l'eau obtenue dans diverses conditions. Les résultats – généralement des valeurs moyennes de plusieurs mesures – ont été récapitulés sous forme de tableaux. Ils montrent clairement les qualités d'eaux que l'on peut réaliser à partir du réseau de distribution de la ville de Berne. L'eau traitée par osmose inverse peut servir à couvrir les besoins de l'Entreprise des PTT en eau pure.

Purificazione dell'acqua mediante osmosi inversa

Riassunto. Nell'introduzione vengono spiegati i principi dell'«osmosi» e dell'«osmosi inversa», e quindi esposte alcune basi teoriche a questo proposito. Si menzionano poi le premesse per l'esecuzione tecnica dell'osmosi inversa. Segue una descrizione dell'impianto con modulo a fibre permeabili utilizzato per i nostri esperimenti. Le prove hanno permesso di stabilire la quantità e la qualità dell'acqua prodotta a differenti condizioni. I risultati degli esperimenti, nella maggior parte dei casi valori medi di diverse misurazioni, sono stati riassunti negli specchietti. Da questi si ottiene un'idea chiara della qualità dell'acqua prodotta, che proviene da acqua prelevata dagli acquedotti di Berna. L'acqua ottenuta mediante osmosi inversa può essere impiegata nella maggior parte dei casi dove l'Azienda delle PTT ha bisogno di acqua demineralizzata.

1 Einleitung

Für die Aufbereitung von Wasser zu Trink- oder industriellen Zwecken sind heute eine Vielzahl von technischen Verfahren im Gebrauch. Je nach der Zusammensetzung des Rohwassers und dem Verwendungszweck des reinen Wassers wird versucht, durch Ausflocken, Filtration, Adsorption, Oxidation oder Änderung des pH-Wertes usw. dem Wasser gewisse unerwünschte Bestandteile zu entziehen. Zur Wasserentsalzung dienen vor allem die Verfahren Ionenaustausch, Elektrodialyse, Destillation und umgekehrte Osmose. Besonders die Ionenaustauschverfahren haben heute eine sehr grosse Verbreitung gefunden, neben denen zum Beispiel das energieaufwendige Verfahren der Destillation stark in den Hintergrund getreten ist. Aber auch der Ionenaustausch ist nicht für jeden Verwendungszweck als ideal zu bezeichnen. Besonders das Regenerieren der beladenen Harze stellt einige Probleme. Zwar kann die Regeneration heute vollautomatisch durchgeführt werden, so dass das umständliche und unbeliebte Hantieren mit Säure und Lauge wegfällt. Trotzdem bringt die Notwendigkeit des Regenerierens eine merkbare Verteuerung des Ionenaustauschverfahrens. Dabei ist leicht einzusehen, dass mit steigendem Salzgehalt des Rohwassers die Kosten ansteigen. Ausserdem werden die Abwässer durch die Regeneration stark belastet. Das Verfahren der umgekehrten Osmose bringt in dieser Hinsicht eine Verbesserung.

Was ist überhaupt umgekehrte Osmose? Betrachten wir zunächst das Prinzip der gewöhnlichen Osmose, das seit über 200 Jahren bekannt ist: Man bringt in einem Gefäss eine Unterteilung an, die aus einer halbdurchlässigen (semipermeablen) Membrane, zum Beispiel Schweinsblase

1 Introduction

En vue d'obtenir des eaux potables ou des eaux industrielles, on utilise aujourd'hui de nombreux procédés techniques. Suivant la composition de l'eau brute et l'emploi envisagé de l'eau pure, le traitement consiste à éliminer les éléments indésirables, par coagulation, filtration, adsorption, oxydation ou modification du pH, etc. Les procédés de dessalement les plus courants sont les échangeurs d'ions, l'électrodialyse, la distillation et l'osmose inverse. A l'heure actuelle, les échangeurs d'ions sont très répandus et les processus nécessitant beaucoup d'énergie, tels que la distillation, perdent de plus en plus de terrain. Toutefois, les échangeurs d'ions ne représentent pas une solution idéale dans tous les cas. La régénération des résines polluées, en particulier, pose certains problèmes. Il est vrai qu'on peut actuellement l'automatiser, ce qui élimine la manipulation à la fois compliquée et indésirable des acides et des bases. Malgré cela, la régénération par échangeurs d'ions implique un renchérissement sensible. On s'aperçoit d'emblée que les frais croissent en proportion de la teneur en sels de l'eau brute. De plus, le procédé de régénération pollue considérablement les eaux usées. A cet égard, l'osmose inverse apporte une amélioration sensible.

Qu'entend-on en fait par osmose inverse?

Considérons tout d'abord le principe de l'osmose naturelle, connue depuis plus de 200 ans: On subdivise une cuve par une membrane semi-perméable, une vessie de porc ou une feuille de matière synthétique, par exemple. Après avoir introduit de l'eau pure dans l'un des compartiments et une solution aqueuse de sels minéraux dans l'autre (fig. 1), on s'aperçoit après un certain temps que

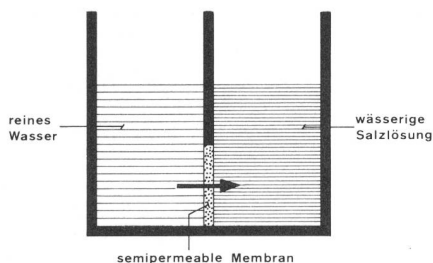


Fig. 1
Normale Osmose – Osmose directe

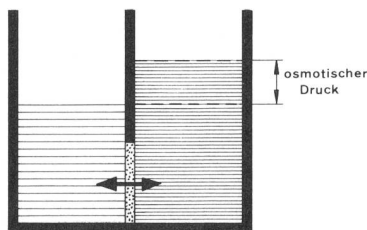


Fig. 2
Osmotisches Gleichgewicht – Equilibre osmotique

oder Kunststoff-Folie, besteht. Bringt man nun auf die eine Seite der Membrane reines Wasser, auf die andere Seite eine Salzlösung (Fig. 1), so beobachtet man nach einiger Zeit auf der Salzseite ein Ansteigen des Flüssigkeitsniveaus. Es muss also von der Wasserseite her Wasser in die Salzlösung eindringen. Die ideale semipermeable Membrane lässt nur Wassermoleküle, aber keine Salzteilchen (Ionen) durch. Die Diffusion des Wassers findet zwar in beiden Richtungen durch die Membrane statt, jedoch bevorzugt in Richtung der Salzlösung. Dieser Vorgang wird Osmose genannt. Die Osmose dauert so lange an, bis der im Innern der Salzlösung entstehende hydrostatische Überdruck bewirkt, dass pro Zeiteinheit gleichviel Wassermoleküle in beiden Richtungen durch die Membrane wandern. Die Lösung wird also nur bis zu einer bestimmten Höhe ansteigen (Fig. 2). Der hydrostatische Druck, der aus der Niveaudifferenz der beiden Flüssigkeiten entsteht, entspricht dem osmotischen Druck.

Man kann nun den Vorgang der Osmose dadurch umkehren, dass man auf die Salzlösung einen Druck ausübt, so dass der Gesamtdruck grösser wird als der osmotische Druck dieser Lösung (Fig. 3). Dabei wird das Wasser durch die Membrane zurückgepresst und die Konzentration der Salzlösung steigt an. Diesen Vorgang nutzt man nun zur Entsalzung und Reinigung von Wasser technisch aus.

Das technische Problem der umgekehrten Osmose besteht darin, eine Membrane zu finden, deren Porengrösse gerade so gross ist, dass die Wassermoleküle durchtreten können, aber gleichzeitig so fein, dass alle Salzteilchen zurückgehalten werden. Gleichzeitig soll sie auch einem grösseren einseitigen Druck standhalten können. Dass eine solche ideale Membrane bis heute nicht gefunden (beziehungsweise hergestellt) werden konnte, dürfte einleuchten. Man muss sich daher mit einem Kompromiss begnügen, bei dem man stets einen gewissen Durchschlupf von Salzteilchen durch die Poren in Kauf nehmen muss.

2 Einige theoretische Grundlagen der Osmose und umgekehrten Osmose

Nach *van't Hoff* gilt für den osmotischen Druck folgende Beziehung:

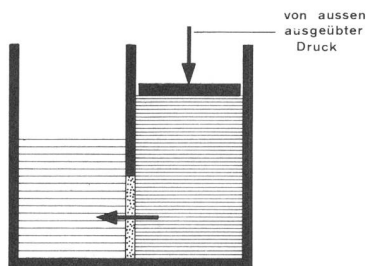


Fig. 3
Umgekehrte Osmose – Osmose inverse

le niveau du liquide s'élève du côté du soluté. Il doit donc y avoir pénétration de l'eau dans la solution saline. Une membrane semi-perméable idéale laisserait passer uniquement des molécules d'eau et retiendrait toutes les particules (ions) de sel. Bien que l'eau diffuse au travers de la membrane dans les deux directions, un flux plus intense s'écoule vers la solution saline. Ce phénomène est appelé osmose. L'osmose dure jusqu'à ce que la suppression hydrostatique naissant à l'intérieur du soluté transfère un nombre égal de molécules d'eau au travers de la membrane, dans les deux directions, par unité de temps. La solution ne s'élèvera donc que jusqu'à un niveau déterminé (fig. 2). La pression hydrostatique engendrée par la différence de niveau des deux liquides correspond à la pression osmotique.

Nous pouvons inverser le phénomène de l'osmose, en appliquant au-dessus de la solution saline une pression telle que la pression totale devienne supérieure à la pression osmotique de cette solution (fig. 3). Il en résulte que de l'eau est refoulée au travers de la membrane et que la concentration du soluté augmente. Ce procédé technique est utilisé pour dessaler et purifier l'eau.

Le problème à résoudre consiste à trouver une membrane dont les pores soient juste assez grands pour laisser passer les molécules d'eau, mais en même temps si fins que toutes les particules de sel soient retenues. De plus, elle doit pouvoir résister à une pression unilatérale assez considérable. Il tombe sous le sens qu'une telle membrane n'a pas encore été découverte (ou réalisée) à ce jour. Il faut dès lors se contenter d'un compromis et accepter un certain taux de passage des sels minéraux au travers des pores.

2 Quelques principes théoriques de l'osmose et de l'osmose inverse

Selon *van't Hoff*, l'expression suivante s'applique à la pression osmotique:

$$\pi = \frac{n}{V} \cdot RT \quad (1)$$

où π Pression osmotique

n Nombre de moles de la substance dissoute

V Volume de la solution en litres

R Constante des gaz parfaits (0,08206 litre·atm·degré⁻¹·mole⁻¹)

T Température absolue en Kelvin

Il est étonnant de rencontrer la constante des gaz parfaits à ce propos. Or, on peut montrer à l'aide d'appareils appelés osmomètres que les molécules dissoutes dans l'eau se comportent, lors de l'osmose, comme des molécules gazeuses. Les règles suivantes s'appliquent en l'occurrence:

$$\pi = \frac{n}{V} \cdot RT \quad (1)$$

dabei bedeuten:

- π osmotischer Druck
- n Anzahl Mole der gelösten Substanz
- V Volumen der Lösung in Liter
- R Gaskonstante ($0,08206 \text{ Liter} \cdot \text{atm} \cdot \text{grad}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$)
- T absolute Temperatur in Kelvin

Es erstaunt, in diesem Zusammenhang die Gaskonstante R anzutreffen. Man kann nun durch Versuche mit sogenannten Osmometern zeigen, dass sich tatsächlich die in Wasser gelösten Moleküle bei der Osmose verhalten, wie wenn sie gasförmig wären. Dabei findet man folgende Gesetzmässigkeiten:

- 1 Der osmotische Druck ist proportional der Konzentration der gelösten Substanz.
- 2 Äquimolare (zum Beispiel einmolare) Lösungen von Nichtelektrolyten haben den gleichen osmotischen Druck.
- 3 Elektrolyte haben einen höheren osmotischen Druck als nach 2 zu erwarten wäre. Durch die Dissoziation der Elektrolyte in Wasser (Ionen) erhöht sich die Zahl der Teilchen entsprechend.
- 4 Bei Nichtelektrolyten (zum Beispiel Zucker) erreicht der osmotische Druck ziemlich genau 1 atm ($1 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar}$), wenn 1 Mol bei 0°C in 22,4 l Wasser aufgelöst wird. Denselben Druck übt 1 Mol eines idealen Gases aus, wenn es bei 0°C einen Raum von 22,4 l erfüllt.
- 5 Löst man 1 Mol eines Nichtelektrolyten in 1 l Wasser, statt in 22,4 l, so erhält man bei 0°C einen osmotischen Druck von 22,4 atm.
- 6 Erwärmt man diese Lösung, so steigt der osmotische Druck um $1/273$ je $^\circ \text{C}$ an.

Es sind zahlreiche Theorien und Formeln aufgestellt worden, um den Mechanismus des Durchtritts des Wassers und der Teilchen gelöster Substanzen durch semi-permeable Membranen zu erklären. Wir begnügen uns hier mit der Angabe zweier einfacher Formeln.

$$Q_{\text{Wasser}} = K_{\text{Wasser}} \cdot \frac{O}{d} (\Delta P - \Delta \pi) \quad (2)$$

$$Q_{\text{Substanz}} = K_{\text{Substanz}} \cdot \frac{O}{d} \cdot \Delta C \quad (3)$$

Es bedeuten:

- Q Menge durchtretendes Wasser beziehungsweise Substanzen
- K Permeabilitätskoeffizient der Membrane für Wasser beziehungsweise gelöste Substanzen
- O Oberfläche der Membrane
- d Dicke der Membrane
- ΔP Druckunterschied zwischen den beiden Membranseiten
- $\Delta \pi$ Druckunterschied des osmotischen Druckes zwischen den beiden Membranseiten
- ΔC Differenz der Substanzkonzentrationen auf den beiden Membranseiten

3 Die technische Durchführung der Umkehrosmose

Wie bereits erwähnt, hängt die technische Anwendung der umgekehrten Osmose von einer geeigneten Membrane ab. Abgesehen von der optimalen Porengrösse muss diese Membrane, wie wir der Formel (2) entnehmen können, eine möglichst grosse Oberfläche aufweisen, dazu mög-

- 1 La pression osmotique est proportionnelle à la concentration des substances dissoutes.
- 2 Les solutions équimolaires (par exemple monomolaires) de non-électrolytes ont la même pression osmotique.
- 3 Les électrolytes ont une pression osmotique plus élevée que prévisible selon 2. Par la dissociation de l'électrolyte dans l'eau (ions), le nombre des particules augmente en proportion.
- 4 La pression osmotique des non-électrolytes (par exemple le sucre) atteint assez exactement 1 atm ($1 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar}$), si 1 mole est dissoute à 0°C dans 22,4 l d'eau. La même pression est exercée par 1 mole d'un gaz idéal, si ce gaz occupe un volume de 22,4 l à 0°C .
- 5 Si l'on dissout 1 mole d'un non-électrolyte dans 1 l d'eau, au lieu de 22,4 l, on obtient une pression osmotique de 22,4 atm à 0°C .
- 6 Si l'on chauffe cette solution, la pression osmotique augmente de $1/273$ par $^\circ \text{C}$.

De nombreuses théories et formules ont été proposées en vue d'expliquer le mécanisme du passage de l'eau et des particules de substance dissoute au travers des membranes semi-perméables. Nous nous contenterons d'indiquer ici deux formules simples:

$$1. Q_{\text{eau}} = K_{\text{eau}} \cdot \frac{O}{d} (\Delta P - \Delta \pi) \quad (2)$$

$$2. Q_{\text{substance}} = K_{\text{substance}} \cdot \frac{O}{d} \cdot \Delta C \quad (3)$$

où

- Q Flux d'eau respectivement de substances
- K Coefficient de perméabilité de la membrane à l'eau pure respectivement aux substances dissoutes
- O Surface de la membrane
- d Epaisseur de la membrane
- ΔP Pression différentielle de chaque côté de la membrane
- $\Delta \pi$ Pression osmotique différentielle de chaque côté de la membrane
- ΔC Différence de concentration de chaque côté de la membrane

3 Réalisation technique de l'osmose inverse

Comme nous l'avons dit, l'osmose inverse ne peut être appliquée sur le plan technique que si l'on dispose d'une membrane appropriée. Comme l'indique la formule 2, la membrane doit avoir, en plus de pores d'une grandeur adéquate, une surface aussi étendue que possible, des parois minces et une haute résistance à la pression. Il est clair que ces exigences sont en partie contradictoires, par exemple la minceur des parois et la haute résistance à la pression. A ce jour, deux types de membrane sont usuels, les membranes en acétate de cellulose et les membranes en polyamide.

La membrane en acétate de cellulose est généralement constituée par un enroulement en forme de spirale logé dans un ensemble appelé module. Ce dernier présente trois ouvertures: L'admission d'eau brute, la production d'eau pure et l'évacuation du rejet. L'emploi des membranes en acétate de cellulose est limité, du fait des fluctuations trop élevées du pH de l'eau. Le facteur pH doit être situé entre 5 et 7, si l'on veut éviter l'hydrolyse de l'acétate de cellulose. De ce fait, la durée de vie d'un module n'est que de 1 à 2 ans environ. A ce point de vue, les fibres creuses en polyamide aromatique développées par les établissements *Du Pont de Nemours* donnent de meilleurs résultats.

lichst dünnwandig sein, aber trotzdem einen hohen Druck aushalten. Es ist klar, dass sich diese geforderten Eigenschaften zum Teil gegenseitig widersprechen, wie geringe Dicke und hohe Belastbarkeit auf Druck. Bisher sind nur zwei verschiedene Membranmaterialien in Gebrauch: Celluloseacetat und Polyamid.

Die Celluloseacetat-Membrane wird meist in spiralgewickelter Form angewendet und so zu einem sogenannten Modul zusammengebaut. Dieses weist drei Öffnungen auf: Rohwasserzufluss, Reinwasser-(Permeat-)Abfluss und Konzentrat-Abfluss. Dem Einsatz von Celluloseacetat-Membranen sind im Blick auf zu hohe Schwankungen des pH-Wertes des Wassers Beschränkungen auferlegt. Um eine Hydrolyse des Celluloseacetats zu vermeiden, soll der pH-Wert zwischen 5 und 7 liegen. Die Lebensdauer des Moduls beträgt nur etwa ein bis zwei Jahre. Besser geeignet sind in dieser Hinsicht die von der Firma *Du Pont de Nemours* entwickelten Hohlfasern aus aromatischem Polyamid.

Wir befassen uns hier nicht näher mit dem Celluloseacetat-Modul, da wir nur mit dem Hohlfaser-Modul praktische Erfahrungen gesammelt haben.

Das Hohlfaser-Modul nach Du Pont ist wie folgt aufgebaut:

Faserdurchmesser aussen 80 μm

Faserdurchmesser innen 40 μm

Die Hohlfasern halten einen Druck bis zu 45 bar aus. Meist geht man praktisch auf 28 bar. Sie sind innerhalb eines pH-Bereiches von 4 bis 11 brauchbar. Ihre Lebensdauer ist höher als die der Celluloseacetat-Membrane, nämlich etwa 5 Jahre. Ungefähr eine Million Fasern werden zu einem Bündel zusammengefasst, wodurch eine beträchtliche Membran-Oberfläche erreicht wird. Die Enden der U-förmig gebogenen Fasern werden so in eine Epoxid-Harzscheibe eingegossen, dass die Mündungen offenbleiben (Fig. 4). Das ganze Hohlfaserbündel ist in einem Rohr aus glasfaserverstärktem Kunststoff untergebracht, das einem Innendruck von 45 bar zu widerstehen vermag. Diese Einrichtung wird als Modul bezeichnet.

Das Rohwasser wird durch ein poröses Rohr axial in das Modul eingeleitet und durchströmt das Faserbündel radial gegen aussen. Jede Hohlfaser wird so vom Rohwasser umströmt. Unter dem herrschenden Druck dringt das Wasser durch die Rohrwandungen der Fasern und fließt im inneren Hohlraum gegen eines der beiden offenen Enden zu, von wo es nach aussen als Permeat abgeleitet wird. Die zurückbleibenden Salze reichern sich im Rohwasser an. Dieses Konzentrat fließt dann der Rohrwandung des Moduls entlang bis zum Ausgang neben dem Rohwasser-eintritt.

Pour cette raison, nous n'examinerons pas plus en détail les modules en acétate de cellulose, nos expériences pratiques ayant porté sur le module à fibres creuses. Le module à fibres creuses développé par Du Pont se présente ainsi:

Diamètre extérieur des fibres 80 μm

Diamètre intérieur des fibres 40 μm

Les fibres creuses résistent à une pression de 45 bars. En pratique, on va pourtant jusqu'à 28 bars. Ce matériel est utilisable dans une gamme de pH allant de 4 à 11. La durée de vie d'un tel module est supérieure à celle des éléments à membrane en acétate de cellulose, soit 5 ans environ. Les fibres creuses, un million environ, sont réunies en un faisceau, ce qui permet d'atteindre une surface de membrane considérable. Les extrémités des fibres disposées en U sont scellées dans un disque en résine époxy, de manière que les ouvertures des fibres soient libres (fig. 4). Le faisceau de fibres est placé dans une enveloppe renforcée par des fibres de verre, capable de résister à une pression de 45 bars. Ce dispositif est appelé module.

L'eau brute est admise axialement dans le module par l'intermédiaire d'un tube poreux et y chemine radialement, de sorte que chaque fibre creuse est baignée d'eau brute. Sous l'effet de la pression, l'eau pénètre au travers des parois des fibres puis est drainée à l'intérieur vers l'une des deux extrémités ouvertes, où elle s'écoule à l'extérieur sous forme d'eau épurée. Les sels retenus enrichissent l'eau brute. Ce liquide concentré suit les parois du module pour être évacué sous forme de rejet s'écoulant près de l'admission d'eau brute.

Voici quelques caractéristiques du module utilisé lors de nos essais:

Type 042 4" B9S

Dimensions extérieures: 57 cm de long, 14 cm de diamètre Matériel: Résine époxy renforcée par des fibres de verre ou aluminium

Débit d'eau: 4,5 m³/jour

Pression d'utilisation admissible: 28 bars

Gamme de température: 5...30 °C

Gamme de pH: 4...11

Taux de conversion: 25...80%

Dessalement: jusqu'à 98%

Le taux de conversion obtenu est exprimé en pour cent de l'eau brute traitée; il en est de même du rejet. Ainsi, un rejet de 25% correspond à un taux de conversion de 75% d'eau pure.

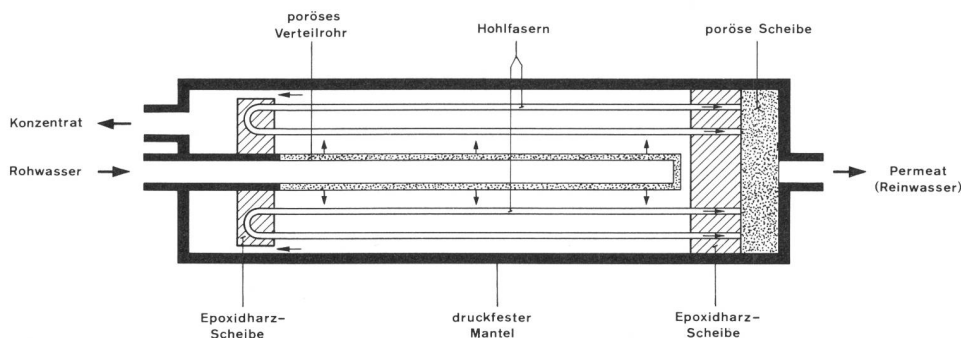


Fig. 4
Schnitt durch Hohlfaser-Modul (schematisch) – Vue en coupe d'un module à fibres creuses (représentation schématique)

Einige Daten des Moduls, das wir für unsere Versuche verwendet haben:

Typ: 042 4" B9S
 Aussenmasse: 57 cm Länge, 14 cm Durchmesser
 Material: glasfaserverstärktes Epoxidharz oder Aluminium
 Produktionsvermögen: ca. 4,5 m³ Wasser pro Tag
 Zulässiger Betriebsdruck: 28 bar
 Temperaturbereich: 5...30 °C
 pH-Bereich: 4...11
 Permeatausbeute: 25...80%
 Entsalzung: bis 98%

Die erhaltene Permeatausbeute wird in Prozenten des zugeführten Rohwassers angegeben, ebenso das abfließende Konzentrat. So entsprechen zum Beispiel 25% Konzentratabfluss einer Ausbeute von 75% Reinwasser.

4 Versuchseinrichtung

Von der Firma *Permo AG*, Bern, wurde uns eine Umkehrosmose-Anlage einschliesslich der notwendigen Installationen zur Vorbehandlung des Wassers sowie allen zugehörigen Armaturen für Versuchszwecke zur Verfügung gestellt. Wir danken an dieser Stelle der Firma für dieses Angebot.

Wir beabsichtigten, durch eigene Versuche abzuklären, wie sich das produzierte Reinwasser mengenmässig und qualitativ unter verschiedensten Bedingungen verhält.

Bei der Anlage handelt es sich um ein Fabrikat der Firma *Degrémont*, Paris. Sie enthält das kleinste Modul der fabri-

4 Installation d'essai

La maison *Permo SA* à Berne a mis à notre disposition une unité d'osmose inverse, y compris les installations de prétraitement et tous les accessoires nécessaires pour les essais envisagés. Nous tenons à la remercier ici de cette offre généreuse. Nos essais visaient à étudier la production d'eau pure sous diverses conditions, tant à l'égard de la quantité qu'à celui de la qualité.

Les équipements des établissements *Degrémont*, Paris, mis à disposition contiennent le module le plus petit de la série fabriquée. Les modules de plus grande dimension permettent d'atteindre une production de 8,5 ou 22 m³ d'eau pure par jour. L'eau dont on alimente une unité d'osmose inverse devrait être exempte de particules solides et de carbonates alcalino-terreux, afin que soit évité le dépôt de particules solides sur les fibres creuses, en particulier l'entartrage des pores par du calcaire. Si tel n'est pas le cas, il faut s'attendre à une diminution rapide du rendement du module. En vue de débarrasser l'eau brute du calcaire, un prétraitement est nécessaire, qui peut être effectué de deux manières. Par acidification de l'eau avec de l'acide chlorhydrique, d'une part, ce qui transforme les bicarbonates en chlorures facilement solubles, d'autre part, au moyen d'un adoucissement par permutation basique sur résines. La deuxième méthode est préférable, car le pouvoir séparateur est moins bon en milieu acide. Débarrasser l'eau du calcaire en le remplaçant par du sodium n'est pas sans présenter aussi certains inconvénients, vu que la fibre creuse retient en principe un peu moins bien les ions à charge simple (tels que Na⁺) que les ions à charge multiple (tels que Ca⁺⁺). Cette rétention des ions n'est pas imputable au principe mécanique du filtre, mais à un effet de répulsion électrostatique.

Pour nos essais, nous avons choisi la permutation basique sur résines. La régénération de l'échangeur d'ions avec du chlorure de sodium est commandée par un dispositif automatique. La figure 5 montre en détail la configuration de l'installation d'essai. Après retrait du calcium et du magnésium, l'eau traverse un filtre au charbon actif 3), qui adsorbe d'éventuelles impuretés organiques et le chlore libre provenant du traitement de l'eau potable. Un filtre à configuration fine 4), monté en aval, retient d'éventuelles particules en suspension. L'eau ainsi prétraitée parvient à un réservoir 5), 6). De là, elle est amenée à une pression de service de 28 bars par une pompe à piston équipée de pressostats et d'amortisseurs 7), puis injectée dans le module 10). Le réglage précis de la pression et du rapport rejet/production d'eau pure se fait au moyen de deux vannes de réglage fin 9) (by-pass) et 13) (rejet). Les deux manomètres 8) (pression d'entrée) et 11) (pression du rejet) permettent des contrôles de pression. Si, pour une raison ou pour une autre, la pression à l'intérieur du module devait s'élever exagérément, par exemple en raison d'une obturation de la conduite de sortie du diffusat, une vanne de sécurité en cas de surpression 12) entre en action; elle est située entre l'orifice d'évacuation du rejet et la vanne de réglage fin 13). Un débitmètre 14) mesure le flux du rejet évacué dans la canalisation 15). Le débit du diffusat peut aussi être contrôlé au moyen d'un débitmètre 16). Un compteur d'eau 17) totalise le débit d'eau épurée. Un robinet 18) autorise le prélèvement d'échantillons d'eau pure. D'ordinaire, elle s'accumule dans un réservoir 19) avec un trop-plein 20). Les composants les plus importants tels

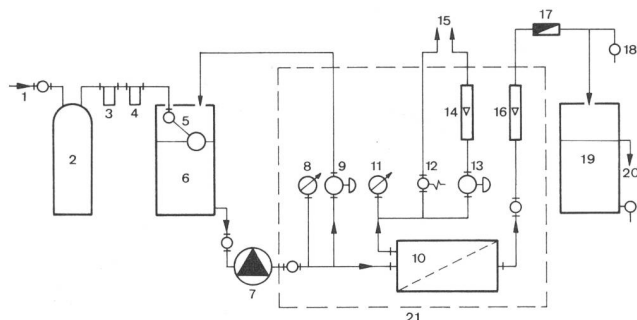


Fig. 5
 Schema der Versuchseinrichtung – Schéma de l'installation d'essai

- 1 Rohwasser-Zuleitung – Arrivée d'eau brute
- 2 Basenaustauscher – Echangeur basique
- 3 Aktivkohlefilter – Filtre au charbon actif
- 4 Feinststofffilter – Filtre à configuration fine
- 5 Schwimmerventil – Vanne à flotteur
- 6 200-l-Vorratsgefäß für enthärtetes Wasser – Réservoir de 200 l pour eau adoucie
- 7 Hochdruck-Kolbenpumpe mit Pressostaten und Stossdämpfer – Pompe à haute pression avec pressostats et amortisseurs
- 8 Manometer (Eingangsdruck) – Manomètre (pression d'entrée)
- 9 Feinreguliertventil (by-pass) – Vanne de réglage fin (by-pass)
- 10 Hohlfasermodule Modell 042 4" B 9 S – Module à fibres creuses, modèle 042 4" B 9 S
- 11 Manometer (Druck-Konzentrat-Ableitung) – Manomètre (pression du rejet)
- 12 Überdruck-Sicherheitsventil – Vanne de sécurité (surpression)
- 13 Feinreguliertventil (Konzentrat) – Vanne de réglage fin (rejet)
- 14 Rotameter (Konzentrat) – Débitmètre (rejet)
- 15 Zur Kanalisation – Vers canalisation
- 16 Rotameter (Reinwasserproduktion) – Débitmètre (production d'eau pure)
- 17 Ringkolben-Wasserzähler – Compteur d'eau à piston
- 18 Probeentnahmehahn – Prélèvement d'échantillons
- 19 200-l-Vorratsgefäß für Reinwasser – Réservoir de 200 l pour eau pure
- 20 Überlaufleitung – Trop-plein
- 21 Apparategehäuse – Boîtier des appareils

zierten Serie. Die grösseren Module erlauben, 8,5 beziehungsweise 22 m³ Reinwasser im Tag zu produzieren.

Das der Umkehrosmose zugeführte Wasser soll frei sein von festen Teilchen sowie von Erdalkalibicarbonaten, um eine Ablagerung von Feststoffen, insbesondere Verkrustung durch Kalk, auf den Hohlfasern beziehungsweise in den Poren zu vermeiden. Andernfalls muss mit einem baldigen Leistungsabfall des Moduls gerechnet werden. Für die Entkalkung des Rohwassers ist somit eine Vorbehandlung notwendig, die auf zwei verschiedene Arten vorgenommen werden kann. Entweder säuert man das Wasser mit Salzsäure an, wobei die Bicarbonate in leichtlösliche Chloride übergeführt werden, oder man nimmt eine Enthärtung mit einem Basenaustauscher vor. Das zweite Verfahren ist vorzuziehen, da im sauren Gebiet die Trennwirkung schlechter ist. Die Entfernung des Calciums aus dem Wasser, an dessen Stelle nun Natrium tritt, ist allerdings auch nicht ganz ohne Nachteile, da im Prinzip einfach geladene Ionen (wie Na⁺) von der Hohl-faser etwas schlechter zurückgehalten werden als zwei- oder mehrfach geladene Ionen (wie Ca⁺⁺), da die Rückhaltung der Ionen nicht auf dem mechanischen Filterprinzip, sondern auf einem elektrostatischen Abstoßungseffekt beruht.

Wir wählten für unsere Versuche den Basenaustausch. Die Regeneration des Austauschers mit Kochsalz wird durch einen Automaten gesteuert. Der weitere Aufbau der Versuchsanlage geht aus *Figur 5* hervor. Nach der Entfernung von Calcium und Magnesium wird das Wasser durch ein Aktivkohlefilter (3) geleitet, das allenfalls anwesende organische Verunreinigungen und von der Trinkwasserchlorierung her vorhandenes freies Chlor adsorbiert. Von einem nachgeschalteten Feinstoff-Filter (4) werden allfällige Schwebstoffe zurückgehalten. Das so vorbehandelte Wasser gelangt in einen Vorratstank (5), (6). Von dort wird es durch eine Hochdruck-Kolbenpumpe (7) (mit Pressostaten und Stossdämpfer ausgerüstet) auf den Betriebsdruck von 28 bar gebracht und dem Modul (10) zugeführt. Die genauere Einstellung des Druckes und des Mengenverhältnisses von Konzentratableitung zu Reinwasserproduktion erfolgt mit den beiden Feinreguliertventilen (9) (By-pass) und (13) (Konzentrat). Eine Druckkontrolle erlauben die beiden Manometer (8) (Eingangsdruck) und (11) (Konzentrat-Druck). Sollte aus irgendeinem Grund, zum Beispiel Behinderung des Permeat-Abflusses, der Druck im Innern des Moduls unzulässig hoch werden, spricht ein Überdruck-Sicherheitsventil (12) an, das sich zwischen Konzentratausgang und Fernreguliertventil (13) befindet. Ein Rotameter (14) erlaubt, den Fluss des abgeleiteten Konzentrats festzustellen, das in die Kanalisation (15) abgelassen wird. Auch der Permeat-Durchfluss kann an einem Rotameter (16) abgelesen werden. Zur Messung der total erzeugten Reinwassermenge dient eine Ringkolben-Wasseruhr (17). Das Reinwasser kann beim Hahn (18) zur Probe entnommen werden. Andernfalls fliesst es in ein 200-l-Vorratsgefäß (19) mit Überlauf (20). Die wichtigsten Apparateile wie Modul, Ventile und Anzeigegeräte sind zusammen in einem Gehäuse (21) untergebracht.

5 Durchgeführte Versuche

51 Rohwasser-Analysen

Da unsere Versuche den Einfluss verschiedener Parameter auf die Qualität des produzierten Wassers zeigen sollten, war vor allem wichtig, die genaue Zusammen-

setzung des Moduls, der Ventile und der Indikatoren in einem Gehäuse (21).

5 Essais réalisés

51 Analyses d'eaux brutes

Vu que nos travaux visaient à montrer l'influence de divers paramètres sur la qualité de l'eau produite, il était surtout important de connaître la composition de l'eau brute utilisée. Toutefois, dès le début de nos essais d'osmose, il apparut que la composition de l'eau de notre réseau de distribution était sujette à des variations considérables. A notre demande, le *Service des eaux de la ville de Berne* nous expliqua que l'eau potable provenait, suivant les circonstances, de l'Emmental ou de la vallée de l'Aar. Par une analyse chimique précise, il nous fut dès lors possible de déterminer nous-mêmes la provenance de l'eau mise en circulation. Le *tableau I* récapitule la composition des deux types d'eau brute utilisés, avant et après adoucissement par échangeur basique sur résines. Les résultats sont des valeurs moyennes d'analyses faites à deux dates différentes. L'eau de l'Emmental a été analysée les 17 et 18 avril 1973 et l'eau de la vallée de l'Aar le 16 avril et le 8 mai 1975.

52 Influence du taux de rejet et de la qualité de l'eau brute

Nos essais ont été effectués à une pression de service normale, c'est-à-dire 28 bars, ce qui correspond à une pression du liquide de rejet de 25...26 bars. Les résultats enregistrés sont des valeurs moyennes provenant de 8 à 10 mesures. Le *tableau II* s'applique aux eaux des deux provenances.

53 Influences de la température, de la pression, de l'adjonction de soude, du filtre «Neutralit» et du vieillissement

Pour déterminer l'influence de la température, il a été examiné dans quelle mesure une légère augmentation de la température influait sur la qualité et la quantité d'eau produite. Pour des raisons pratiques, les tests ont été effectués aux températures de 15,5, 19,9 et 24,0 °C.

Désirant ne pas dépasser la pression de service de 28 bars, nous avons dû tester l'influence de la pression à une valeur plus réduite. A cet effet, nous avons choisi 20 bars.

En ajoutant de la soude (Na₂CO₃) à l'eau adoucie, nous avons voulu lier l'anhydride carbonique libre qui n'est pas retenu par l'osmose inverse, afin d'obtenir une résistivité plus élevée du diffusat. Nous avons préparé une solution de base de 48 g de Na₂CO₃/l, dont 1 ml est capable de lier 20 mg de CO₂ sous forme de NaHCO₃. Pour 1 l d'eau adoucie de la vallée de l'Aar, nous avons ajouté 1 ml de solution de base, pour la même quantité d'eau de l'Emmental – en raison de sa plus faible teneur en CO₂ – 0,8 ml de solution de base. L'adjonction de soude a porté le pH de l'eau de la vallée de l'Aar à 8,90 et celui de l'eau de l'Emmental à 9,20.

Le passage de l'eau adoucie à travers un filtre «Neutralit» avait le même objectif que l'adjonction de soude. Ce filtre contient de la dolomite partiellement calcinée (CaCO₃ · MgO), qui est capable de lier le CO₂ libre dissous dans l'eau.

Le dernier essai de cette série visait à déterminer l'état de fonctionnement du module après un an d'emploi (compte tenu des périodes d'immobilisation intercalées).

Le *tableau III* récapitule les influences qui se produisent lors de la variation des divers paramètres.

Tabelle I. Verwendetes Rohwasser vor und nach der Enthärtung
Tableau I. Eau brute utilisée avant et après adoucissage

Untersuchungen – Données et analyses	Wasser Aaretal Eau de la vallée de l'Aar		Wasser Emmental Eau de l'Emmental	
	vor Enthärtung avant adoucisse- ment	nach Enthärtung après adoucisse- ment	vor Enthärtung avant adoucisse- ment	nach Enthärtung après adoucisse- ment
Fassungstemperatur – Température à la prise (°C)	11,7	16,0	11,0	11,0
Aussehen – Aspect	klar – claire farblos incolore	klar – claire farblos incolore	klar – claire farblos incolore	klar – claire farblos incolore
Spezifischer elektrischer Widerstand – Résistivité ($\Omega \cdot \text{cm}$ bei 20 °C)	2340	2330	3000	3015
pH-Wert – Valeur pH	7,50	7,60	7,70	7,80
pNa-Wert – Valeur pNa	3,80	2,31	3,92	2,37
Gesamtrockenrückstand – Résidu sec total (mg/l)	322,7	302,6	233,3	242,9
Gesamtlührückstand – Résidu de calcination total (mg/l)	184,1	285,5	126,5	219,2
Gesamthärte – Dureté totale (° fr H)	25,00	< 0,01	19,44	< 0,01
Calciumhärte – Dureté calcique (° fr H)	20,61	< 0,01	17,66	< 0,01
Magnesiumhärte – Dureté magnésique (° fr H)	4,39	0	1,78	0
Natriumgehalt – Teneur en sodium (mg/l)	3,7	113	2,8	98
m-Wert – Indice m (ml 1N HCl/l)	4,25	4,15	3,70	3,70
Carbonathärte – Dureté carbonate (° fr H)	21,25	20,75	18,50	18,50
Chlorid – Chlorure (mg/l)	4,65	4,70	3,80	3,90
Sulfat als SO_4^{2-} – Sulfate sous forme de SO_4^{2-} (mg/l)	32	34	7,6	8,8
Nitrat als NO_3^- – Nitrate sous forme de NO_3^- (mg/l)	10,7	10,4	7,2	7,9
Nitrit als NO_2^- – Nitrite sous forme de NO_2^- (mg/l)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Phosphat als PO_4^{3-} – Phosphate sous forme de PO_4^{3-} (mg/l)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Kieselsäure als SiO_2 – Acide silicique sous forme de SiO_2 (mg/l)	4,65	4,80	4,40	4,70
Kaliumpermanganat-Verbrauch – Consommation de permanganate de potassium (mg/l)	4,0	3,30	4,9	4,8
Sauerstoff – Oxygène (mg/l)	7,5 (10. 5. 73)	—	—	—
Freies Kohlendioxid – Anhydride carbonique libre (mg/l)	13,9	11,4	9,7	9,8
Freies Chlor – Chlore libre (mg/l)	0	—	—	—
Eisen – Fer (mg/l)	0,045	0,060	0,030	0,090
Ammonium – Ammoniac (mg/l)	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02

setzung des verwendeten Rohwassers zu kennen. Schon kurz nach Beginn der Osmose-Versuche zeigte sich jedoch, dass die Zusammensetzung unseres Leitungswassers beträchtlichen Schwankungen unterworfen ist. Wie wir dann vom *Wasserwerk der Stadt Bern* auf Anfrage erfuhren, wird unsere Trinkwasserversorgung zeitweise aus dem Emmental oder aus dem Aaretal gespeist. Durch eine genaue chemische Analyse der beiden Wässer war es uns dann möglich, jeweils selbst die Provenienz des augenblicklich fliessenden Wassers festzustellen. In der *Tabelle I* ist die Zusammensetzung der beiden verwendeten Rohwässer vor und nach der Enthärtung im Basenaustauscher zusammengestellt. Bei den Ergebnissen handelt es sich um Durchschnittswerte der Analysen zweier verschiedener Tage. Das Emmental-Wasser wurde am 17./18. 4. 1973, das Aaretal-Wasser am 16. 4./8. 5. 1973 untersucht.

52 Einfluss der abgeleiteten Konzentration und der Rohwasserqualität

Unsere Versuche wurden bei normalem Betriebsdruck, das heisst 28 bar durchgeführt. Dies entspricht einem Druck des Konzentrats von 25...26 bar. Die aufgeführten Ergebnisse sind Mittelwerte von je 8...10 Messungen. In der *Tabelle II* sind sie für beide Wassersorten festgehalten.

53 Einflüsse von Temperatur, Druck, Soda-Zusatz, Neutralit-Filter und Alterung

Beim Temperatureinfluss wurde geprüft, inwiefern sich eine leichte Temperaturerhöhung auf die Qualität und

54 Essais microbiologiques

Les essais microbiologiques avaient pour but de déterminer dans quelle mesure les micro-organismes et pyrogènes étaient retenus dans le module lors de l'osmose inverse. Vu que nous ne pouvions effectuer nous-mêmes des tests bactériologiques et dénombrer les micro-organismes, la pharmacie de l'armée à Berne s'est chargée de ces travaux, ces essais présentant pour elle un intérêt particulier. Nous tenons à remercier vivement ici *M. Bernasconi*, de la pharmacie de l'armée, d'avoir bien voulu nous remettre un rapport aux fins de publication.

Le même module à fibres creuses que pour les essais précédents a été utilisé en l'occurrence, les micro-organismes étant du type *Escherichia coli*.

Ensemencement

Suspension d'ensemencement d'*Escherichia coli*: Culture d'*Escherichia coli* du type I, à partir de gélose inclinée, dans un bouillon de culture 50 ml/3 d/ 37 °C. A l'aide de cette suspension d'ensemencement, on a ensemencé puis homogénéisé à l'agitateur 150 litres d'eau brute adoucie, après avoir fermé la conduite d'admission d'eau.

Mise en évidence de germes

E. coli: 50 ml non dilués, soit 1:10 par filtre à membrane sur gélose selon Endo/37 °C/2 d (appréciation d'après le manuel des denrées alimentaires 1969)

Nombre total de germes: 1 ml non dilué, soit 1:10 dans une gélose nutritive /30 °C/3 d

Tabelle II. Einfluss der Konzentrat-Ableitung und der Wasserqualität
Tableau II. Influence du taux de rejet et de la qualité de l'eau

Herkunft des Wassers – Provenance de l'eau	Konzentrat Abfluss – Rejet en %	Wasser-temperatur – Température de l'eau °C	Spezifischer elektrischer Widerstand in $\Omega \cdot \text{cm}$ (20 °C) Résistivité en				pH-Wert Valeur du pH 20 °C	Trocken-rückstand Résidu sec mg/l	freies CO ₂ CO ₂ libre mg/l	Salzrück-halterver-mögen – Rétention des sels en % **
			Leitungs-wasser – Eau du réseau	Enthärtetes Wasser – Eau adoucie	Konzentrat – Rejet	Produktion – Production				
Emmental	20	12,7	2958	2945	592	118 000	6,30	6,1	6,4	97,5
	25	14,0	2991	2984	768	139 100	6,15	5,5	6,4	97,9
	33	12,6	2943	2957	1014	155 400	6,30	5,6	—	98,1
	50	11,5	3000	2987	1547	185 400	6,20	4,6	6,5*	98,4
	60	10,7	3008	3008	1855	192 300	6,15	4,0	6,4	98,4
Aaretal – Vallée de l'Aar	20	15,3	2367	2302	480	89 200	6,15	7,7	9,5	97,4
	25	15,5	2299	2230	584	95 600	6,00	7,1	10,2	97,7
	33	15,0	2350	2305	801	109 200	6,15	6,3	8,9	97,9
	50	13,7	2339	2289	1179	123 600	6,15	5,5	9,5	98,1
	60	14,4	2384	2317	1445	128 000	6,10	5,3	9,7	98,2

* Zusätzlich untersucht – Analysé en plus: Calcium – Calcium <0,1 mg/l
Natrium – Sodium 1,2 mg/l
Chlorid – Chlorure <0,1 mg/l
KMnO₄-Verbrauch – Consommation de KMnO₄ 2,3 mg/l

** Berechnet aus den spezifischen elektrischen Widerständen des Reinwassers und des enthärteten Wassers – Calculé d'après la résistivité de l'eau pure et celle de l'eau adoucie

Menge des produzierten Wassers auswirkt. Wir prüften aus praktischen Gründen bei den Temperaturen 15,5 °C, 19,9 °C und 24,0 °C.

Da wir den normalen Betriebsdruck von 28 bar nicht überschreiten wollten, musste der Druckeinfluss bei einem niedrigeren Wert geprüft werden. Wir wählten 20 bar.

Mit einem Zusatz von Soda (Na₂CO₃) zum enthärteten Wasser bezweckten wir, die freie Kohlensäure, die bei der umgekehrten Osmose nicht zurückgehalten wird, zu binden und damit einen höheren spezifisch elektrischen Widerstand des Permeats zu erzielen. Es wurde eine Stammlösung von 48 g Na₂CO₃/l angesetzt, von der 1 ml imstande ist, 20 mg CO₂ in Form von NaHCO₃ zu binden. Dem enthärteten Aaretal-Wasser wurden pro Liter je 1 ml Stammlösung, dem Emmental-Wasser, entsprechend seinem geringeren CO₂-Gehalt, je 0,8 ml Stammlösung zugesetzt. Der Sodazusatz erhöhte den pH-Wert des Aaretal-Wassers auf 8,90, den des Emmental-Wassers auf 9,20.

Dem gleichen Zweck wie der Sodazusatz diene der Durchlauf des enthärteten Wassers durch ein Neutralität-Filter. Bei der Füllung des Filters handelt es sich um einen teilweise gebrannten Dolomit (CaCO₃·MgO), der imstande sein soll, das im Wasser gelöste, freie CO₂ zu binden.

Der letzte Versuch in dieser Reihe diene dazu, festzustellen, wie gut das Modul nach einjährigem Gebrauch (mit dazwischen liegenden Stillstandsperioden) noch funktioniert.

In der *Tabelle III* sind die Einflüsse zusammengestellt, wie sie sich beim Verändern der verschiedenen Parameter ergeben.

54 Mikrobiologische Versuche

Durch die mikrobiologischen Versuche sollte abgeklärt werden, wie weit Mikroorganismen und Pyrogene bei der umgekehrten Osmose im Modul zurückgehalten werden. Da wir die Kultur und Auszählung der bakteriologischen Proben nicht selbst vornehmen konnten, wurden diese Arbeiten von der *Armeeapotheke* in Bern übernommen, da

Mise en évidence de pyrogènes

Mise en évidence d'endotoxine de Coli par micro-méthode sur lamelles au Limulus avec 10 µl pour chaque test.

Prélèvement d'échantillons

Au moyen d'éprouvettes de prélèvement stériles

Eau brute à partir du mélange d'eau du réservoir de 200 l

Eau pure à partir du tuyau du module

Rejet à partir du tuyau d'évacuation du rejet

Le *tableau IV* récapitule les essais microbiologiques des 10 et 11 juillet 1974 et du 22...25 juillet 1974.

6 Analyse des résultats obtenus

Nos essais ont montré que la qualité de l'eau produite par osmose inverse peut être influencée par divers facteurs.

La teneur en sels résiduelle des eaux de la vallée de l'Aar et de l'Emmental – dont la teneur en sels est précisément différente à l'origine – est dans une large mesure proportionnelle à celle de l'eau brute. Ainsi, un résidu sec de 233 mg/l pour l'eau de l'Emmental conduit à un résidu sec de 5,5 mg/l dans l'eau épurée (compte tenu d'un rejet de 25%). L'eau de la vallée de l'Aar ayant un résidu sec de 323 mg/l fournit un diffusat dont le résidu sec pèse 7,1 mg/l. Le pouvoir de rétention moyen atteint donc 97,7%. Il est aussi possible de calculer le pouvoir de rétention des sels à partir de la résistivité des échantillons d'eau pris en considération, comme le montre le *tableau II*.

La pression avec laquelle l'eau est envoyée au travers de la membrane exerce en premier lieu une influence sur la quantité du diffusat résultant. Pourtant, il s'avère que la qualité de l'eau épurée change également. Contrairement à ce que l'on pourrait supposer, la teneur en sels n'augmente pas en fonction de la pression, mais elle diminue. Ainsi, l'eau de l'Emmental soumise à une pression de 28 bars a produit un diffusat ayant un résidu sec de 5,5 mg/l, pour un taux de rejet de 25%. Ce même résidu sec atteignait 7,1 mg/l à une pression de service de 20 bars. Ce comportement apparemment paradoxal peut être expliqué par le

Tabelle III. Verschiedene Einflüsse
Tableau III. Influences diverses

Versuchsart – Genre de l'essai	Herkunft des Was- sers – Prove- nance de l'eau	Konzentrat- Abfluss – Rejet %	Wasser- tempera- tur – Tempéra- ture de l'eau °C	Rein- wasser- produk- tion – Produc- tion d'eau pure l/h	Spezifischer elektrischer Widerstand in $\Omega \cdot \text{cm}$ (20° C) Résistivité en				pH-Wert Valeur du pH 20 °C	Trocken- rückstand Résidu sec mg/l	freies CO ₂ libre mg/l
					Leitungs- wasser – Eau du réseau	Enthärte- tes Wasser – Eau adoucie	Konzent- rat – Rejet	Produk- tion – Produc- tion			
Temperatur- einfluss – Influence de la température	Aaretal Vallée de l'Aar	25	15,5	174,4	2299	2230	584	95 600	6,00	7,1	10,2
	Aaretal Vallée de l'Aar	25	19,9	219,7	2396	2335	625	85 100	6,30	8,2	8,3
	Aaretal Vallée de l'Aar	25	24,0	254,5	2366	2337	631	75 200	6,25	9,8	9,6
Erniedrigter Druck – Pression réduite (20 bar) Vergleich: Normal- druck – Comparai- son: Pression nor- male (28 bar)	Emmental	25	13,9	125,0	2982	2977	753	109 000	6,40	7,1	6,5
	Emmental	25	14,0	169,8	2991	2984	768	139 100	6,15	5,5	6,4
Sodazusatz – Ad- jonction de soude	Aaretal Vallée de l'Aar	25	14,7	173,1	2300	1885	498	205 300	7,75	4,1	0,6
	Emmental	25	16,0	196,0	2905	2452	639	206 800	7,80	5,8	0,6
Mit Neutralitfilter – Avec filtre Neutralit	Emmental	25	13,2	182,6	3120	3090	789	121 200	6,60	—	4,9
Nach 1 Jahr Betrieb – Après 1 année de service	Emmental	25	13,3	183,2	3044	3096	792	106 800	—	—	—
	Emmental	50	12,9	178,9	3081	3108	1605	160 600	—	—	—

dort ein spezielles Interesse an diesen Versuchen vorlag. Für die Überlassung des betreffenden Versuchsberichtes zur Publikation sprechen wir Herrn *Dr. Bernasconi* unseren besten Dank aus.

Die Versuche wurden mit *Escherichia coli* im selben Hohlfasermembranmodul durchgeführt, wie es für die vorhergehenden Versuche verwendet worden war.

Impfung

Escherichia coli-Impfsuspension: Kultur von *E. coli* Typ I ab Schrägagar in Nährbouillon 50 ml/3 d/ 37 °C.

Mit dieser Impfsuspension wurden 150 l enthärtetes Rohwasser beimpft und mit einem Rührwerk bei abgestellter Wasserzufuhr homogenisiert.

Keimnachweis

E. coli: 50 ml unverdünnt beziehungsweise 1:10 über Membranfilter auf Endo-agar/37 °C/2 d

(Beurteilung gemäss Lebensmittelbuch 1969).

Gesamtkeime: 1 ml unverdünnt beziehungsweise 1:10 in Nähragar/30 °C/3 d.

Pyrogennachweis

Nachweis von Coli-Endotoxin durch Mikro-Limulus-Test mit je 10 µl.

Probeentnahme

Mittels steriler Kappengläser

Rohwasser: ab Mischwasser im 200-l-Tank

Reinwasser: aus Schlauch vom Modul

Konzentrat: ab Schlauch von Konzentratablauf

In der *Tabelle IV* sind die mikrobiologischen Versuche vom 10./11. 7. 1974 und 22.–25. 7. 1974 zusammengestellt.

fait que les fibres creuses s'étanchéifient lorsque la pression augmente de toutes parts et que, de ce fait, la grandeur des pores s'amenuise. Parallèlement, le passage de sels diminue. Le *taux de rejet* exerce également une influence marquée sur la qualité de l'eau. Plus le taux de rejet est considérable, plus la qualité de l'eau épurée augmente. Cette relation apparaît clairement au vu des valeurs de la résistivité, du résidu sec et du pouvoir de rétention des sels du tableau II. Vu qu'un taux de rejet élevé signifie une perte d'eau, il s'est révélé que la rentabilité du processus était la meilleure pour un taux de rejet de 25%. Néanmoins, il est possible d'utiliser l'eau de rejet pour divers usages, par exemple pour les chasses de WC et, vu qu'elle est adoucie, à des fins de lavage.

L'influence exercée par la *température* sur la quantité d'eau pure produite est considérable. A 20 °C, par exemple, la quantité d'eau produite augmente de 4% par degré d'élévation de température. Par ailleurs, on s'aperçoit aussi que la qualité de l'eau se détériore lorsque la température s'accroît. Les essais d'*adjonction de soude* ont montré que le pouvoir séparateur des fibres creuses était meilleur en milieu alcalin. Par cette adjonction, la teneur en sels du diffusat a pu être considérablement abaissée (de 7,1 à 4,1 mg/l pour l'eau de la vallée de l'Aar). En même temps, il s'est révélé que l'eau épurée était pratiquement exempte d'anhydride carbonique (la trace qui a été trouvée lors d'un prélèvement d'échantillon a pu passer de l'air dans l'eau). Cette double efficacité de l'adjonction de soude a une certaine signification pratique. Il suffit, en effet, d'ajouter une faible dose d'une solution de soude à l'eau brute adoucie, pour améliorer sensiblement la qualité de l'eau pure.

Tabelle IV. Mikrobiologische Versuche

Datum Zeit	Behandlung	Probe	Gesamtkeime pro ml	Coli pro ml	Coli- Endotoxin pro µl
10. 7. 74	Produktion	Reinwasser	65	—	negativ
3 min	Coli-Beimpfung	Rohwasser	14 000	—	positiv
	Produktion	Reinwasser	33	—	negativ
12 min	Produktion	15 l			
		Reinwasser	38	—	negativ
25 min	Produktion	60 l			
		Reinwasser	36	—	negativ
		130 l			
11. 7. 74	Desinfektion mit Formalin 1%ig über Nacht				
4 h	Spülung	Rohwasser	74	—	
4 h	Produktion	Reinwasser	0	—	
9 h	Produktion	Reinwasser	0	—	
	Stilllegung während 11 Tagen (Diffusion)				
22. 7. 74		Rohwasser	11 700	—	
5 min	Produktion	Reinwasser	650		
	Coli-Beimpfung	Rohwasser	10 500	> 5000	positiv
3 min	Produktion	Reinwasser	21	6	negativ
		15 l			
15 min	Produktion	Konzentrat	11 700	> 5000	positiv
		65 l			
25 min	Produktion	Reinwasser	26	7	negativ
		120 l			
23. 7. 74	Normal-Betrieb (Selbstreinigung)				
		Rohwasser	1 000	0	negativ
	Produktion	Reinwasser	9	0	negativ
	Stilllegung während 24 h (Diffusion)				
24. 7. 74		Rohwasser	4 900	0	positiv
	Produktion	Reinwasser	310	0	negativ
	Produktion	Konzentrat	> 100 000	> 5000	positiv
25. 7. 74	Desinfektion mit Formalin 1%ig über Nacht				
	Spülung				
		Rohwasser	1 200	0,06	
	Produktion	Reinwasser	2	0	
	Produktion	Konzentrat	1 400	0,2	

Tableau IV. Essais microbiologiques

Date Durée	Traitement	Echantillon	Nombre total de germes par ml	E. coli par ml	Coli- Endotoxine par µl
10. 7. 74	Production	Eau pure	65	—	négatif
3 min	Ensemencement avec E. coli	Eau brute	14 000	—	positif
	Production	Eau pure	33	—	négatif
		15 l			
12 min	Production	Eau pure	38	—	négatif
		60 l			
25 min	Production	Eau pure	36	—	négatif
		130 l			
11. 7. 74	Désinfection à la formaline 1% pendant la nuit				
4 h	Rinçage	Eau brute	74	—	
4 h	Production	Eau pure	0	—	
9 h	Production	Eau pure	0	—	
	Mise hors service pendant 11 jours (diffusion)				
22. 7. 74		Eau brute	11 700	—	
5 min	Production	Eau pure	650		
	Ensemencement avec E. coli	Eau brute	10 500	> 5000	positif
3 min	Production	Eau pure	21	6	négatif
		15 l			
15 min	Production	Rejet	11 700	> 5000	positif
		65 l			
25 min	Production	Eau pure	26	7	négatif
		120 l			
23. 7. 74	Service normal (auto-nettoyage)				
		Eau brute	1 000	0	négatif
	Production	Eau pure	9	0	négatif
	Mise hors service pendant 24 heures (diffusion)				
24. 7. 74		Eau brute	4 900	0	positif
	Production	Eau pure	310	0	négatif
	Production	Rejet	> 100 000	> 5000	positif
25. 7. 74	Désinfection à la formaline 1% pendant la nuit				
	Rinçage				
		Eau brute	1 200	0,06	
	Production	Eau pure	2	0	
	Production	Rejet	1 400	0,2	

6 Auswertung der Versuchsergebnisse

Unsere Versuche zeigen, dass die Qualität des aus der Umkehrosmose gewonnenen Wassers durch verschiedene Faktoren beeinflusst werden kann. Bei den in ihrem *Salzgehalt* unterschiedlichen Wässern aus Emmental und Aaretal ist der Rest-Salzgehalt weitgehend proportional zum Salzgehalt des Rohwassers. So entspricht einem Trockenrückstand des Emmental-Wassers von 233 mg/l ein solcher des entsprechenden Reinwassers (bei 25% Konzentrat-Ableitung) von 5,5 mg/l. Beim Aaretal-Wasser bewirken 323 mg/l Trockenrückstand einen solchen von 7,1 mg/l im entsprechenden Permeat. Wir erhalten somit ein durchschnittliches Rückhaltevermögen von 97,7%. Das Salzurückhaltevermögen kann auch aus dem Verhältnis der spezifisch elektrischen Widerstände der betreffenden Wasserproben berechnet werden, wie dies in Tabelle II geschehen ist.

Der *Druck*, mit dem das Wasser durch die Membrane gepresst wird, beeinflusst zwar in erster Linie die Menge des erzielten Permeats. Doch zeigt sich, dass dabei auch die Qualität ändert. Der Salzgehalt nimmt mit zunehmendem Druck nicht etwa zu, wie man zunächst erwarten könnte, sondern ab. So haben wir beim Emmental-Wasser bei 25% Konzentratabfluss und einem Druck von 28 bar einen Trockenrückstand von 5,5 mg/l, bei 20 bar dagegen einen erhöhten Trockenrückstand von 7,1 mg/l. Dieses scheinbar paradoxe Verhalten kann man sich dadurch erklären, dass die Hohlfasern durch den zunehmenden allseitigen Ausendruck verdichtet werden und somit die Porengrösse kleiner wird. Parallel dazu sinkt der Salzdurchlass. Einen deutlichen Einfluss auf die Wasserqualität übt ebenfalls die Menge des *Konzentratabflusses* aus. Je grösser der Konzentratabfluss, umso besser die Wasserqualität. Diese Beziehung geht deutlich aus den Werten für den spezifischen elektrischen Widerstand, den Trockenrückstand und das Salzurückhaltevermögen in Tabelle II hervor. Da ein grösserer Konzentratabfluss aber einen Wasserverlust bedeutet, ist die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens am besten bei einem Konzentratabfluss von etwa 25% gewährleistet. Es ist aber immerhin möglich, das Konzentrat noch für verschiedene Verwendungszwecke einzusetzen, wie WC-Spülung und, da es enthärtet ist, auch für Waschzwecke. Der *Temperatureinfluss* auf die produzierte Reinwassermenge ist beträchtlich. So beträgt beispielsweise bei 20 °C die Zunahme der produzierten Wassermenge etwa 4% je Grad Temperaturerhöhung. Ausserdem ist die Tendenz sichtbar, bei steigender Temperatur eine schlechtere Wasserqualität zu ergeben. Die Versuche mit dem *Sodazusatz* zeigen, dass die Hohlfasern im alkalischen Bereich eine bessere Trennwirkung ergeben. Der Salzgehalt des Permeats liess sich durch den Zusatz beträchtlich senken (beim Aaretal-Wasser von 7,1 auf 4,1 mg/l). Zugleich erwies sich das Permeat als praktisch kohlendioxidfrei (die gefundene Spur dürfte bei der Probefassung aus der Luft in das Wasser gelangt sein). Diese zweifache Wirkung des Sodazusatzes ist von einer gewissen praktischen Bedeutung. Durch eine einfache Zudosierung einer Sodalösung zum enthärteten Rohwasser lässt sich die Qualität des Reinwassers wesentlich verbessern.

Dagegen hat der Versuch mit dem *Neutralitfilter* keinen wesentlichen Erfolg gebracht, indem der CO₂-Gehalt des Wassers nur unbedeutend gesenkt werden konnte. Die Absorption des CO₂ im Neutralitfilter lässt somit zu wünschen übrig.

En revanche, l'essai avec le filtre «*Neutralit*» n'a pas été très concluant, la teneur en CO₂ de l'eau n'ayant pu être réduite que dans une proportion insignifiante. L'absorption du CO₂ dans le filtre «*Neutralit*» laisse donc à désirer.

Une comparaison de la résistivité de l'eau pure obtenue au début, puis après *une année de service* du module, montre que la qualité du diffusat a quelque peu diminué (de 139,1 à 106,8 kΩ·cm). Pour l'instant, il n'est pas possible de déterminer si la perméabilité aux sels des fibres creuses a augmenté ou si certaines fibres se sont rompues.

Les *essais microbiologiques* ont démontré un bon effet de filtrage des fibres creuses à l'égard des bactéries et des pyrogènes. Par rapport à l'*Escherichia coli*, l'efficacité du module est de 1 à 0,0025, ce qui correspond à 99,75% de germes retenus. Par rapport à la flore microbienne existant normalement, l'efficacité en service normal est d'environ 1 à 0,01, soit une rétention de 99% des germes. Par rapport à l'endotoxine d'*Escherichia coli*, on peut admettre une efficacité quasi équivalente. Dans l'eau épurée, il n'a été possible, dans aucun cas, de mettre en évidence plus de 0,01 µg/l d'endotoxine de coli. Après une immobilisation de l'installation d'osmose, la teneur en germes de l'eau brute, de l'eau pure et de l'eau de rejet augmente très fortement (croissance exponentielle). Le rapport entre le nombre de germes de l'eau brute et celui de l'eau épurée reste pratiquement constant (1 à 0,063 après 11 jours; 1 à 0,05 après 1 jour). Par conséquent, des phénomènes de diffusion de germes ne se manifestent pas ou dans une mesure infime.

Après une période d'immobilisation, l'installation peut être pratiquement débarrassée de germes par un rinçage avec une solution de formaldéhyde à 1% (24 h) ou par auto-nettoyage en service normal (12 h).

7 Applications pratiques de l'osmose inverse

Ainsi que nos essais l'ont montré, le procédé de l'osmose inverse permet de dessaler dans une proportion de 97...98% une eau ayant une teneur en sels de 300 mg par litre, comme l'eau potable du réseau de distribution de la ville de Berne. L'eau pure obtenue peut être utilisée à de nombreux usages, par exemple dans les installations de climatisation (hydro-épuration de l'air), pour l'alimentation des tours de refroidissement ou des chaudières, dans la fabrication de la bière et des eaux de table, etc. Par ce procédé, il est aussi possible de concentrer des jus de fruits ou des extraits de plantes. D'autre part, on peut récupérer les métaux précieux dans les eaux de process de l'industrie galvanotechnique.

Si une eau entièrement dessalée est nécessaire, l'osmose inverse peut être suivie d'une finition sur échangeurs d'ions avec lits mélangés. Ce procédé permet d'obtenir une eau de très haute pureté. Alimenté par une eau prétraitée, l'échangeur d'ions a une capacité jusqu'à 50 fois supérieure. Une autre possibilité consiste à monter un deuxième module en série avec le premier, l'eau de rejet du deuxième étant recyclée dans le premier. Les eaux converties par ce procédé, dit à deux étages, sont également d'une haute pureté et sont notamment utilisées dans la fabrication des semi-conducteurs, les industries photographique et pharmaceutique ainsi que pour l'alimentation des chaudières à haute pression. Cette eau n'est pas seulement dessalée, mais aussi débarrassée des substances colloïdales et organiques (toutes les matières organiques dont le poids moléculaire est supérieur à 200 sont retenues par l'osmose inverse).

Der Vergleich des spezifischen elektrischen Widerstandes des Reinwassers vor und nach *einem Jahr Betrieb* des Moduls zeigt, dass die Permeat-Qualität etwas zurückgegangen ist (von 139,1 auf 106,8 $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$). Es lässt sich vorläufig nicht beurteilen, ob die Durchlässigkeit der Hohlfasern für Salzteilchen grösser geworden ist oder ob einzelne Fasern gebrochen sind.

Die *mikrobiologischen Versuche* haben eine gute Filterwirkung der Hohlfasern gegenüber Bakterien und Pyrogenen ergeben.

Bezogen auf *Escherichia coli* beträgt der Wirkungsgrad des Moduls 1 zu 0,0025. Es werden somit 99,75% der Keime zurückgehalten.

Bezogen auf die normal vorhandene Keimflora beträgt der Wirkungsgrad bei Normalbetrieb rund 1 zu 0,01. Somit werden 99% der Keime zurückgehalten.

Bezogen auf *Escherichia coli*-Endotoxin kann ein ähnlich hoher Wirkungsgrad angenommen werden. Im Reinwasser war in keinem Fall mehr als 0,01 $\mu\text{g/ml}$ Coli-Endotoxin nachweisbar.

Nach einer Stilllegung des Osmosebetriebs steigt der Keimgehalt im Rohwasser, Reinwasser und Konzentrat sehr stark an (exponentielles Wachstum). Das Verhältnis zwischen Keimzahl im Rohwasser und Reinwasser bleibt zeitlich nahezu konstant (1 zu 0,063 nach 11 Tagen; 1 zu 0,055 nach 1 Tag). Somit treten Keimdiffusionserscheinungen nicht oder nur in geringster Masse auf.

Die Apparatur kann nach einer Stilllegungsperiode entweder mit 1%iger Formaldehydlösung (24h) oder durch Selbstreinigung im Normalbetrieb (12h) weitgehend keimarm gemacht werden.

7 Praktische Anwendungsmöglichkeiten der Umkehrosmose

Wie wir bei unseren Versuchen gesehen haben, wird ein Wasser mit rund 300 mg Salzgehalt je Liter, wie es für das Leitungswasser der Stadt Bern zutrifft, durch das Verfahren der umgekehrten Osmose zu 97...98% entsalzt. Das erzielte Reinwasser kann somit für viele Zwecke bereits verwendet werden, so etwa für Klimaanlage (Luftwäscher), Kühlturmspeisewasser, Kesselspeisewasser, Brauereiwasser, Trinkwasser usw. Man kann nach diesem Verfahren auch Fruchtsäfte und Pflanzenextrakte konzentrieren, ferner aus Abwässern der Galvanotechnik Metalle zurückgewinnen.

Wird ein vollentsalztes Wasser benötigt, so kann der Umkehrosmose ein Mischbett-Ionenaustauscher nachgeschaltet werden. Dieses Verfahren ergibt ein Wasser höchster Reinheit. Der Entsalzer erhält durch die Speisung mit bereits weitgehend entsalztem Wasser eine bis 50fach

Pour les besoins de l'Entreprise des PTT, la qualité d'eau obtenue par osmose inverse simple (un seul passage) suffit en général. L'eau ainsi produite peut être utilisée pour faire l'appoint des accumulateurs (si sa résistivité est supérieure à 50 000 $\Omega \cdot \text{cm}$). Cette qualité d'eau suffit également sans plus pour l'alimentation des installations d'humidification.

Depuis une année et demie, une installation d'osmose inverse est en service dans le bâtiment du Centre de calcul électronique à Berne-Ostermundigen. Elle débite 48 m^3 d'eau épurée par jour, dont la résistivité atteint au moins 100 000 $\Omega \cdot \text{cm}$.

Avec le temps, l'osmose inverse supplantera en partie les systèmes à échangeurs d'ions, notamment les installations à deux colonnes. En effet, l'osmose répond mieux aux impératifs de la protection de l'environnement, nécessite moins d'entretien et conduit de ce fait à une réduction des frais de production.

grössere Kapazität. Ein weitere Möglichkeit besteht darin dem ersten Modul ein zweites nachzuschalten, wobei der Konzentratablauf des zweiten Moduls zur Speisung des ersten Moduls wiederverwendet werden kann. Die auf die angegebene Art zweistufig entsalzten Wässer sind ebenfalls von höchster Reinheit und werden unter anderem in der Halbleiterfabrikation, Fotoindustrie, pharmazeutischen Industrie und für Hochdruckkesselspeisung verwendet. Das Wasser ist nicht nur entsalzt, sondern auch frei von Kolloiden und organischen Stoffen (alle organischen Stoffe mit einem Molekulargewicht von über 200 werden vom Umkehrosmose-Modul zurückgehalten).

Für die Bedürfnisse der PTT-Betriebe genügt normalerweise die Wasserqualität, wie sie durch einmaligen Osmosedurchgang erhalten wird. Das so erzeugte Wasser darf zum Nachfüllen von Akkumulatoren (wenn spezifischer elektrischer Widerstand grösser als 50 000 $\Omega \cdot \text{cm}$ ist) verwendet werden. Auch zur Speisung von Luftbefeuchtungsanlagen genügt diese Wasserqualität vollauf.

Im Gebäude des elektronischen Rechenzentrums in Bern-Ostermundigen befindet sich seit 1½ Jahren eine Umkehrosmoseanlage in Betrieb, die im Tag 48 m^3 entsalztes Wasser von mindestens 100 000 $\Omega \cdot \text{cm}$ liefert.

Die umgekehrte Osmose wird das Verfahren des Ionenaustausches mit der Zeit teilweise verdrängen, insbesondere die Zweisäulenanlagen, da das Osmoseverfahren umweltfreundlicher ist, weniger Wartung erfordert und daher eher tiefere Produktionskosten verursacht.