

DIE GEWINNUNG VON TRINK- UND BRAUCHWASSER EINE DER WICHTIGSTEN AUFGABEN ZUR UEBERWINDUNG DER NAHRUNGS- UND ENERGIEKRISE

1. Historischer Rückblick

Der Wunsch, trinkbares Wasser aus Seewasser zu gewinnen oder Brauchwasser zur Bewässerung zu erzeugen, ist ein alter Traum der Menschen. Als Moses im 13. Jahrhundert vor unserer Zeitrechnung in die Wüste zog, lenkte er den Unwillen seines Volkes auf sich, weil es kein Trinkwasser gab. Moses gab diesen Zorn an die höhere Instanz weiter und hatte Erfolg. »Er schrie zu dem Herrn«, heißt es im 15. Kapitel des Zweiten Buches Moses, »und der Herr wies ihm einen Baum, den tat er ins Wasser, da ward es süß«.

So phantastisch diese Erzählung klingt, so realistisch dürfte sie doch sein, da es tatsächlich Pflanzen gibt, die das Salz im Wasser nach dem Prinzip der umgekehrten Osmose zurückhalten, so daß das Volk Moses durch Auspressen der Pflanzenteile seinen Durst zwar notdürftig, aber doch befriedigen konnte.

Wie viele Gelehrte des Mittelalters, können auch wir uns ebenfalls auf Aristoteles berufen, der in einer seiner Schriften behauptete, daß in einer hohlen Wachskugel, die man 24 Stunden neben einem Schiff ins Seewasser senkt, eine gewisse Menge Trinkwasser gewonnen werden kann. Diese Methode ist, wie vieles, was von großen Geistern geschrieben wurde, vielfach ungeprüft in der Literatur nachfolgender Generationen wieder beschrieben worden, obwohl sie, wie man leicht nachprüfen kann, nicht funktioniert. Vermutlich wird man, wie ein Chemiehistoriker im vergangenen Jahrhundert feststellte, Tongefäße statt der Wachsgefäße in der Schrift des Aristoteles lesen müssen, um die Darstellung wahrscheinlicher zu machen.

Wesentlich eleganter ist das Verfahren, das Alexander von Aphrodisias 200 Jahre vor unserer Zeitrechnung beschrieb, wonach Seeleute Meerwasser auf See kochten und mit großen Schwämmen das verdampfte Wasser auffingen. Beim Ausringen der Schwämme erhielten sie Süßwasser, ein Verfahren, das auch vom Heiligen Basilius in seinen »Homilien« beschrieben wurde. Dieser Vorgang ist in einer neuen Darstellung nachempfunden, Abb. 1, und man

sieht deutlich an dem weit ausladenden Unterkiefer des Matrosen rechts im Bild, daß es auch schon damals besonders befähigte Trinker gab.

Der römische Offizier Plinius erkannte im I. Jahrhundert nach Christus, daß an manchen Stellen des Meeresgrundes Süßwasserquellen vorkommen, und daß das Süßwasser dort wegen seiner geringen Dichte an die Oberfläche steigt. Versuchen der Griechen, die Quellen in der Bucht von Argos auf das Festland zu lenken, indem sie Poseidon aufgezümmte Pferde als Opfer brachten, war allerdings kein Erfolg beschieden. Erst zu Beginn dieses Jahrzehnts hat man die Quellen mit einem Betondamm eingefäßt und das Süßwasser zur Bewässerung der Ebene von Argolis nutzbar machen können.

In der Zeit der großen Entdeckungsreisen hat man sich intensiver mit der Gewinnung von Seewasser durch Destillation beschäftigt. Um 1300 beschrieb der Engländer John of Gadderer die Destillation mit einem Destillierkolben. Zur Trinkwasserversorgung der Kranken führte der englische Admiral Sir Richard Hawkins 1593 ein Destilliergerät mit an Bord. Ob der Genuß des gewonnenen Süßwassers wirklich eine reine Freude war, muß man allerdings bezweifeln, denn nach Hawkins Beschreibung setzte man dem Wasser vor der Destillation Knochenasche, Seifensiederlauge und pulverisierte Kreide zu und nach der Destillation Alaun, Kaliumpermanganat und gepulverte Austernschale. Damit sollte angeblich der Geschmack verbessert werden.

Ein anderes Verfahren geht auf den Italiener Lorgna zurück. Er baute Ende des 17. Jahrhunderts eine Anlage, mit der er aus Meerwasser salzarmes Wasser durch Ausfrieren herstellen konnte. Lange Zeit bezweifelten Mediziner die Verträglichkeit destillierten Wassers für Menschen. Erst eine Statistik der holländisch-ostindischen Kompanie aus den Jahren 1691 bis 1695 wies nach, daß die Sterblichkeit auf Schiffen mit Destillationsanlagen um 50% geringer war als auf Schiffen ohne Destillationsanlagen. Noch 1817 hat man in einem Großversuch an französischen Galeerensträflingen die Verträglichkeit von destilliertem Wasser noch einmal unter Beweis gestellt. Angesichts dieser langen und teilweise auch leidvollen Geschichte der Trink- und Brauchwassergewinnung ist die Frage berechtigt, ob es sich hier nicht um ein in vielen Generationen längst gelöstes Problem handelte. Daß dem nicht so ist, sollen die folgenden Ausführungen zeigen.

Die Trink- und Brauchwassergewinnung stellt sich in neuerer Zeit mehr und mehr als eines der ernsthaftesten Existenzprobleme der Menschheit heraus. Grund dafür ist die mehr als exponentielle Zunahme der Weltbevölkerung, vgl. *Bild 2*.

Danach leben gegenwärtig etwa 3,4 Milliarden Menschen. Im Jahre 2000 werden es fast 7 Milliarden sein und im Jahre 2100, gleiche Zuwachsrates vorausgesetzt, schon etwa 20 Milliarden. Bekanntlich

ist eine Bevölkerungszunahme von der Geburten- und Sterberate abhängig. Die Differenz beider ergibt die Wachstumsrate, und es genügt ein verhältnismäßig geringer Zuwachs der Wachstumsrate, um die Zeit, bis zu der sich eine Bevölkerung verdoppelt, drastisch zu verkürzen, wie die folgende Tabelle illustriert.

Tabelle 1.

Verdopplungszeit in Jahren

Zuwachs einer Bevölkerung in % jährlich	Verdoppelung der Bevölkerung nach Jahren
0,1	700
0,5	140
1,0	70
2,0	35
4,0	18
5,0	14
7,0	10
10,0	7

2. Ausblick auf die Zukunft

Als Beispiel seien einige Länder erwähnt. In Ceylon hat man in den vierziger Jahren DDT eingeführt. Als Folge davon sank die Sterberate sprunghaft, während die Geburtenrate konstant blieb. Der jährliche Bevölkerungszuwachs pendelte sich bei 2,4% ein, was wiederum eine Verdoppelung der Bevölkerung in 30 Jahren bedeutet. Mexiko weist mit 3,4% eine weit höhere Bevölkerungszunahme als Ceylon auf.

Die Verdopplungszeit beträgt dort etwa 20 Jahre. Hingegen weist die Bevölkerung Schwedens derzeit nur eine jährliche Wachstumsrate von 0,8% auf, was zu einer Verdoppelung in 87 Jahren führt.

Aufgrund klimatischer Bedingungen sind aber nur kleine Teile der Erde für den Menschen bewohnbar, wie *Bild 3* zeigt. In diesen dicht besiedelten Gebieten ist natürlich auch die Zuwachsrate am größten. Das biologische Gleichgewicht wird dadurch dort in bedrohlichen Maße gestört: Es werden mehr Rohstoffe und Nahrungsmittel benötigt als vorhanden sind und, wie in jedem geregelten System, kann es zu einem Kollaps kommen, bei dem das bisher geregelte System aus dem Gleichgewicht gerät, weil die Störfaktoren die Regelfähigkeit übertreffen. Engpässe liegen in der Versorgung der Bevölkerung mit Wasser, Nahrungsmitteln, Energie und Rohstoffen, wie Kohle, Öl, Metalle u. a., die nur in begrenzter Menge vorhanden sind. Sicher ist die Ernährungslage das gravierendste Problem, auch wenn sie gegenwärtig gelegentlich in den Industrieländern von der Energiekrise überschattet wird. Die Food and

Agriculture Organization (FAO) der Vereinten Nationen hat daher 1969 einen Plan zur Behebung der Ernährungskrise vorgelegt mit einer Reihe sehr detaillierter politisch wohl jedoch schwer realisierbarer Vorschläge. Alle diese Vorschläge werden letztlich nicht zum gewünschten Erfolg führen, solange die Zuwachsrate der Bevölkerung größer ist als die Zuwachsrate an Nahrungsmitteln. Natürlich weiß man, durch welche Maßnahmen man mehr Nahrungsmittel erzeugen kann. Dazu gehören eine Steigerung der landwirtschaftlich nutzbaren Fläche, die Bewässerung trockener Landstriche, die Verbesserung des Bodens durch Düngemittel, Verwendung ertragreicher und schnellwüchsiger Kulturpflanzen, Anwendung von Pestiziden und Herbiziden, Gewinnung von Nahrung aus dem Meer. Auf allen diesen Gebieten sind in den letzten Jahren erhebliche Anstrengungen unternommen und beachtliche Erfolge erzielt worden. Dennoch muß man den Kampf um die Zukunftssicherung der Menschheit als verloren ansehen, wenn es nicht gelingt, die Zuwachsraten zu dämpfen und ein stabiles Gleichgewicht zwischen erreichbarem Zuwachs an Wasser, Nahrungsmitteln und Energie und Bevölkerungszuwachs zu erzielen. Vor diesem Hintergrund muß man die Bemühungen um die Gewinnung von Trink- und Brauchwasser sehen, die zweifelsohne einen der wichtigsten Faktoren zur Sicherung des Nahrungs- und Energiebedarfs darstellen. Dennoch gilt auch hier, daß sich die Schere zwischen erreichbarem und benötigtem Bedarf weiter öffnen wird, wenn die Bevölkerung der Erde mit der gleichen atemberaubenden Geschwindigkeit weiterwächst. Nur die gemeinsamen Anstrengungen von Wissenschaftlern und Politikern werden verhindern können, daß unser Lebensraum zu sehr aus dem Gleichgewicht gerät.

3. Wasservorkommen- und bedarf

Obwohl die Erdoberfläche zu etwa 73% mit Wasser bedeckt ist, sind von dem frei vorkommenden Wasser nur 1,7% Süßwasser, davon befinden sich 97% als Eis in den Polargebieten, so daß nur 0,5% des insgesamt vorkommenden Wassers nutzbar sind. Trotzdem ist diese Wassermasse mit $7 \cdot 10^{14}$ m³ immer noch so gigantisch, daß man überhaupt keinen Wassermangel hätte, wenn das Süßwasser dort vorhanden wäre, wo es gebraucht wird. Leider ist dies nicht so, wie *Bild 4* zeigt. In den ariden Zonen um den nördlichen und südlichen Wendekreis, die 60% der nicht von Meeren bedeckten Fläche der Erde einnehmen, leben nur 5% der Erdbevölkerung. Auf den übrigen 40% der Erdoberfläche leben — auf wenige Ballungsgebiete zusammengedrängt — 95% der Menschen.

In den industriellen Ballungsgebieten wird meistens Grundwasser benutzt, häufig bis an die Grenze der Leistungsfähigkeit der Vor-

räte. Vielfach macht sich schon ein drastischer Grundwasserschwund bemerkbar, und zwar nicht nur, weil die Vorräte überstrapaziert werden, sondern auch, weil bewohnte und industrialisierte Flächen das Einsickern der Niederschläge in den Erdboden behindern. Für die öffentliche Wasserversorgung wird man daher künftig Oberflächenwässer aus Seen und Flüssen nutzen oder Süßwasser aus dem Meer gewinnen müssen.

Wegen der Ausdehnung der Großstädte zu mächtigen Ballungszentren sehen sich Gebiete wie die USA, Japan, große Teile Europas, und selbst niederschlagsreiche Staaten wie die Niederlande hinsichtlich ihrer Wasserversorgung vor ähnliche Probleme gestellt. Aus diesem Grunde hat man in einigen Ländern, wie in den UdSSR, den USA und auch in Großbritannien vom Staat Milliardenbeträge aufgewendet, um die Entwicklung von Entsalzungsanlagen voranzutreiben.

Auch die großen Touristenzentren zeichnen sich im Gegensatz zu ihrer landwirtschaftlichen Schönheit häufig nicht durch Wasserreichtum aus.

Wer beispielsweise die jugoslawische Adriaküste bereist hat, weiß, daß einige Küstenstriche und zahlreiche Inseln trinkwasserarm sind. Die dadurch entstehenden Probleme werden verschärft durch die Vermehrung der 450.000 Bewohner um 850.000 Touristen.

Weitgehend ungenutzt sind bisher die reichen Bodenschätze an den Westküsten des südlichen Afrikas, von Chile und von Australien.

Will man erst eine Industrie aufbauen und Lebensraum schaffen, so wird man zuerst die Wasserversorgung sicherstellen müssen.

Wie sieht es nun in Zukunft mit unserem Wasserbedarf aus? Leider fehlen genaue Untersuchungen über den Bedarf in Europa weitgehend. Bisher existieren nur grobe Schätzungen. Genaue Untersuchungen sind aus den Vereinigten Staaten bekannt. Dort betrug der Bedarf an Wasser im Jahre 1970 etwa 15 Billionen m³ täglich, im Jahr 1980 schätzt man den Bedarf auf 24 Billionen m³ täglich und im Jahre 2000 auf 34 Billionen m³ täglich. Für das Jahr 1980 rechnet man mit einem Defizit, das nicht aus natürlichen Vorkommen gedeckt werden kann, von 1,6 Billionen m³ täglich. Dieses soll im Jahre 2000 schon auf 10 Billionen m³ täglich angewachsen sein.

Im Jahre 2000 wird man demnach rund 1/3 des Bedarfes nicht aus natürlichen Wasservorräten entnehmen können sondern auf andere Weise, beispielsweise aus dem Meer, gewinnen müssen. Eine ähnliche Tendenz ist auch für Europa erkennbar. Noch schwieriger ist die Situation in Nordafrika, den arabischen Ländern, in den meisten asiatischen Ländern, in Südamerika und in vielen afrikanischen Gebieten. Dort fehlt es heute schon an Wasser, so daß die Hebung

des Lebensstandards und die Existenzsicherung angesichts einer raschen wachsenden Bevölkerung in Frage gestellt sind und zu schwerwiegenden internationalen Problemen führen werden.

4. Kostenentwicklung

Der erste Schritt zur Behebung des gewaltigen Defizits besteht in einer besseren Ausnützung der vorhandenen natürlichen Vorräte.

Man wird es sich an vielen Stellen der Erde nicht mehr leisten können, Wasser zu verschwenden oder Flüsse und Seen mehr als erträglich und zulässig »thermisch« zu belasten. Man wird daher dazu übergehen müssen, für viele Kühlprozesse geschlossene Wasserkreisläufe zu verwenden, man wird Abwässer wieder reinigen und erneut verwenden müssen. Man wird schließlich Frischwasser aus entfernteren Gegenden durch Rohrleitungen an den Ort des Bedarfs transportieren. Diesem Vorhaben sind allerdings Grenzen gesetzt, wie man an *Bild 5* erkennt. Wie man sieht, sind die Kosten für entsalztes Wasser umso geringer, je größer der Tagesbedarf ist. Dies zeigt die gestrichelte Kurve. Werden daher beispielsweise 800 m^3 je Tag in Küstennähe benötigt, und befindet sich in 160 km Entfernung eine Frischwasserquelle, so sind die Kosten für die Förderung des Frischwassers schon größer als die für die Gewinnung von Süßwasser aus dem Meer. Mit der Weiterentwicklung der Entsalzungsverfahren wird sich die gestrichelte Kostenkurve für entsalztes Wasser noch weiter nach unten zu kleineren Wasserkosten hin verschieben, vor allem bei großen Mengen entsalzten Wassers. Prognosen für die voraussichtliche Kostenentwicklung des Wasserpreises sind vom »U.S. Department of the Interior« gegeben worden. Sie sind in *Bild 6* wiedergegeben. An einigen Punkten der Kurve sind die Verdampfergrößen angegeben, welche der Ermittlung der Wasserkosten zugrundeliegen. Danach errechnen die Verfasser für Verdampferanlagen von 200.000 m^3 Tagesleistung mit einem Wasserpreis zwischen 30 und 40 Pfennig je m^3 . Schon in der ersten Hälfte der 80er Jahre rechnen die Verfasser mit Anlagen von 600.000 m^3 je Tag und Wasserkosten von 30 Pfennig je m^3 . Beachtet man, daß der theoretische Mindestbedarf zur Sicherung der menschlichen Existenz unter der Annahme, der Mensch könne sich allein mit Brot ernähren, $1,1 \text{ m}^3$ je Tag beträgt, so würde jede dieser Anlagen fast 550.000 Menschen versorgen können. Da der Wasserbedarf jedoch drastisch steigt, wenn man nur $0,5 \text{ kg}$ tierische Fette und Proteine der Nahrung hinzufügt, und dann $9,5 \text{ m}^3$ je Person und Tag beträgt, wird man tatsächlich auch mit einer so großen Anlage nur etwa 63.000 Menschen versorgen können. Ob man, wie die Autoren meinen, 1990 tatsächlich Anlagen mit 2 Millionen m^3 Tagesleistung und Wasserkosten von weniger als 20 Pfennig je m^3 erreichen wird, ist derzeit noch schwer vorhersehbar. Realistisch sind die aus dem

Diagramm ablesbaren Kosten für 1975. Danach beträgt der Wasserpreis einer 50.000 m³ leistenden Großanlage etwa 50 Pfennig je m³, während eine Anlage mittlerer Größe von 10.000 m³, die mit Öl und oder Kohle beheizt wird, zu Wasserkosten von 80 Pfennig je m³ führt. Die Wasserkosten von Großanlagen liegen also nicht mehr allzu sehr über den Kosten für die konventionelle Trinkwassergewinnung. Hinzu kommt, daß der Reinheitsgrad höher ist als der des konventionellen Trinkwassers, so daß man das Destillat auch für höchste Anforderungen der Industrie verwenden kann. Dennoch ist das entsalzte Wasser ein industrielles Produkt und seine Kosten können überall dort mit denen von Frischwasser konkurrieren, wo Wasserquellen in der Nähe des Verbrauchers zur Verfügung stehen. Wasserentsalzung kommt daher vor allem dort in Betracht, wo die natürlichen Wasserquellen erschöpft sind. In ariden Zonen wird dies vielfach die einzige Möglichkeit der Wasserversorgung sein. Überall dort, wo Wasserquellen nicht im Überfluß vorhanden sind, wird man gleichzeitig Maßnahmen ergreifen müssen, um die häufig erschreckend hohen Verluste gering zu halten. Man wird für den Bedarf der Industrie wirksamere Kreisläufe ersinnen müssen, Pflanzen anbauen, die weniger Wasser benötigen und auch mit Brackwasser auskommen. Vor allem der Behandlung und Wiederaufbereitung von Abwässern wird man gesteigerte Aufmerksamkeit widmen müssen. Erst wenn alle diese Maßnahmen ausgeschöpft sind, dürften Verfahren der Gewinnung von Süßwasser aus dem Meerwasser rentabel sein.

5. Entsalzungsverfahren

Welches sind nun die Verfahren zur Entsalzung des Meerwassers und zur Gewinnung von Brauchwasser? Zunächst verdient es festgehalten zu werden, daß von den vielen Vorschlägen und Patenten zur Gewinnung von Trink- und Brauchwasser nur wenige zur Betriebsreife entwickelt wurden.

Grundsätzlich lassen sich alle Verfahren in zwei Gruppen einteilen, solche, bei denen der Entsalzungsprozess ohne, und solche, bei denen er mit Änderung des Aggregatzustandes abläuft. Obwohl theoretisch der Energiebedarf zur Abtrennung von reinem Wasser aus Meerwasser bei allen Verfahren gleich ist und nur etwa 0,8 kW je m³ beträgt, unterscheiden sich die Verfahren doch hinsichtlich des Energiebedarfs und hinsichtlich der Betriebskosten erheblich. Während die Verfahren mit Änderung des Aggregatzustands hinsichtlich der Betriebskosten unabhängig vom Salzgehalt des Rohwassers sind, steigen die Betriebskosten der Verfahren ohne Änderung des Aggregatzustands mit dem Salzgehalt.

Einen Überblick über die verschiedenen Verfahren gibt *Bild 7*.

Verfahren mit Änderung des Aggregatzustands	Verfahren ohne Änderung des Aggregatzustands
1. Destillation Verdampfung mit Sonnenenergie Verdampfer mit senkrechten Rohren Verdampfer mit waagerechten Rohren Vielstufige Entspannungsverdampfung Brüdenkompression 2. Kristallisation Gefrierverfahren Hydratverfahren	1. Membranverfahren und Ionenaustausch Ionenaustausch Elektrodialyse Piezodialyse Elektrochemische Prozesse Biologische Prozesse 2. Flüssig-flüssig Extraktion

Mehr als 95% des entsalzten Wassers wird durch Destillation gewonnen. Die dazu gehörenden Verfahren sind am weitesten entwickelt und werden in Anlagen aller Größen eingesetzt. An der Weiterentwicklung der Gefrierverfahren wird immer noch gearbeitet. Die Hydratverfahren sind hingegen noch nicht über das Experimentierstadium hinausgelangt, während die reverse Osmose nach einer langen Periode der Membranentwicklung nun zur kommerziellen Anwendung zu kommen scheint.

Weit entwickelt sind auch die Verfahren der Elektrodialyse und in gewissem Umfang auch die des Ionenaustauschs. Ihre Wirtschaftlichkeit wird maßgeblich beeinflusst vom Salzgehalt des Rohwassers, der sich sowohl auf den Verbrauch der elektrischen Energie wie auch auf den Verbrauch an Chemikalien für die Regeneration der Harze auswirkt. Man wird diese Verfahren daher vorzugsweise zur Reinigung von Brackwasser anwenden. Die Destillation mit Sonnenenergie ist ebenfalls ein gut entwickelter Prozeß, dessen Anwendung allerdings auf Anlagen kleiner Kapazität begrenzt ist. Sie eignet sich zur Versorgung kleiner Gemeinden in Gebieten mit großer Sonneneinstrahlung.

Aufgabe aller Verfahren ist die Entfernung der Kochsalze und der anderen Salze. Für den Verbrauch in Haushalten gilt ein Salzgehalt von 500 mg je Liter Wasser gerade noch als zulässig. Bedenkt man, daß Seewasser 35.000 mg Salz je Liter enthält, so besteht die Aufgabe also darin, den Salzgehalt auf 1/70 zu verringern. Zur Bewässerung von Pflanzen bedarf es sogar eines Salzgehaltes von höchstens 250 mg je Liter. Tatsächlich gibt es aber noch viele menschliche Ansiedlungen, deren Wasser 1.000 mg Salz je Liter und gelegentlich sogar noch mehr Salz enthält.

Die Zahl der verschiedenen Varianten der einzelnen Entsalzungsverfahren ist so groß, daß sie Gegenstand eines Handbuches sein müßten. Im folgenden soll daher nur das Prinzip der wichtigsten Entsalzungsverfahren dargestellt werden.

5.1 Destillation mit Sonnenenergie

Ein besonderes einfaches Verfahren ist das der Destillation mit Sonnenenergie. Wie *Bild 8* zeigt, füllt man eine Wanne mit geschwärztem Boden mit Meerwasser. Die Wanne ist durch ein Glasdach abgedeckt. Da die Sonnenstrahlen von dem dunklen Wannengboden stärker absorbiert werden als von dem strahlungsdurchlässigen Glasdach erhitzt sich das Meerwasser und verdunstet teilweise. Der gebildete Wasserdampf kondensiert an dem kälteren Glasdach und fließt zu einer Auffangrinne. Die Investitionskosten für derartig einfache Anlagen sind natürlich sehr gering, Energiekosten entstehen überhaupt nicht. Leider ist aber auch die Ausbeute gering, sie beträgt täglich 0,5 bis 6 Liter Süßwasser je Quadratmeter Bodenfläche. Ohne Frage ist die Destillation durch Sonnenenergie der günstigste Prozeß für kleine Entsalzungsanlagen an Orten hoher Sonneneinstrahlung. Eine der ersten größeren Anlagen nach dem Prinzip der Solardestillation wurde 1872 in Chile errichtet. Sie erzeugte täglich 19 m³ frisches Wasser und arbeitete fast 40 Jahre lang. Im zweiten Weltkrieg waren die Rettungsboote der U.S.-Luft- und Seestreitkräfte mit kleinen Destillationsanlagen aus Plastik ausgestattet. In den darauf folgenden Jahren hat man zahlreiche Versuchsanlagen und auch kommerzielle Anlagen errichtet. Das Interesse an der Nutzung der Sonnenenergie zur Wasserentsalzung ist weltweit und in vielen Ländern wird intensiv an der Verbesserung des Verfahrens gearbeitet. In Pakistan wird gegenwärtig eine Sonnendestillationsanlage mit einer Fläche von 18000 Quadratmetern und einer Leistung von 70.000 Litern je Tag erstellt. Ihre Lebensdauer wird auf 30 Jahre geplant.

5.2 Verdampfungs- und Gefrierverfahren (Destillation und Kristallisation)

Das bekannteste und heute am meisten angewandte Verdampfungsverfahren ist die vielstufige Entspannungsverdampfung, kurz auch MSF-Verfahren genannt nach der englischen Bezeichnung Multi-stage-flashevaporation. *Bild 9* zeigt das Schema des Verfahrens. Das auf einen Druck von etwa 2 bar verdichtete Meerwasser wird im Enderhitzer a durch Wärmezufuhr auf eine Temperatur von etwa 120°C erhitzt. Es wird dann in die erste Verdampferstufe 1 geleitet, deren Druck etwas geringer ist. Dadurch entspannt das

Wasser und ein Teil verdampft. Der entstehende Dampf kondensiert an den Vorwärmerohren c_1 und dient zum Aufheizen des in den Enderhitzer strömenden Meerwassers. Danach wird die angereicherte Sole der nächsten Kammer 2 zugeführt, wo wieder ein geringerer Druck herrscht und sich der Vorgang von Kammer 1 wiederholt. Das in Wannen in jeder Kammer aufgefangene Kondensat wird ebenfalls von Stufe zu Stufe entspannt und verläßt die letzte Kammer als Destillat. Das Bild zeigt eine der meistens verwandten sogenannten Umwälzanlagen. Dort wird der größte Teil der Sole aus der letzten Stufe dem Rohwasser wieder zugemischt, nachdem dieses die letzte Stufe N durchlaufen hat und anschließend chemisch vorbehandelt und entspannt wurde. Dadurch verringert man den Rohwasserbedarf und somit auch den Aufwand für die Vorbehandlung. Wie die Darstellung zeigt, entsteht in den einzelnen Kammern eine bestimmte Dampfmenge, die wieder kondensiert wird und dabei gleichzeitig das ankommende Rohwasser aufheizt. In der letzten Verdampfungsstufe N ist die Temperatur der Sole gewöhnlich so niedrig, daß man den bei der Entspannung entstehenden Dampf gerade noch mit dem Rohwasser kondensieren kann. In kommerziellen Anlagen werden 20 bis 30 Behälter kaskadenförmig hintereinander geschaltet. Um den Energiebedarf gering zu halten, empfehlen sich folgende Möglichkeiten:

1. Man erhöht die Stufenzahl und verringert damit den Temperaturunterschied, um den ein Enderhitzer erwärmt werden muß. Diesem Vorgehen sind Grenzen gesetzt, da die Baukosten steigen.

2. Man erhöht die Eintrittstemperatur zur ersten Stufe. Damit steht ein größerer Energieunterschied zwischen Enderhitzer und letzter Stufe zur Verfügung. Da dieser Energieunterschied zur Dampfbildung ausgenutzt wird, kann mehr Dampf und damit auch mehr Destillat erzeugt werden. Auch diesem Vorhaben sind Grenzen gesetzt, da bei zu hoher Eintrittstemperatur im Meerwasser gelöste andere Salze, insbesondere Calcium-Kemihydrat ausfallen und zur Krustenbildung führen.

3. Man vergrößert die Heizflächen in den einzelnen Stufen und betreibt diese daher mit kleineren Temperaturunterschieden. Hierdurch erhöhen sich allerdings ebenfalls die Baukosten.

In *Bild 10* ist der Energiebedarf einer Umwälzanlage über der Eintrittstemperatur der ersten Stufe aufgetragen, wie er in einer unserer früheren Arbeiten ermittelt wurde. Bisherige Anlagen arbeiten zur Vermeidung von Krustenbildung im schattierten Bereich unter 120° C. Würde es gelingen, die Eintrittstemperatur auf beispielsweise 180° C zu erhöhen, so würde eine 30-stufige Anlage mit einem um 29% geringeren Energiebedarf auskommen. Man erkennt daraus deutlich, daß die Bemühungen vor allem dahin gehen müssen, Anlagen mit höherer Eintrittstemperatur betreiben zu können.

Ein Nachteil des Entspannungsverdampfers besteht darin, daß man zur Gewinnung einer bestimmten Destillatmenge eine mehr-

fach größere Solemenge umwälzen muß. Dies ist auf die im Vergleich zur Wärmekapazität große Verdampfungsenthalpie des Wassers zurückzuführen. Infolgedessen braucht man für eine Anlage, die 20.000 m³ Süßwasser täglich erzeugt, einen Umlauf von etwa 170.000 m³ täglich oder 2 m³ in der Sekunde.

Dieser Nachteil wird beim Einsatz von Fallfilmverdampfern vermieden, weil die Dampferzeugung durch kondensierenden Dampf besorgt wird. Dort hängt der Solestrom nur von der gewünschten Konzentration der Ablauge ab und beträgt nur 1/5 bis 1/4 der Werte des Massenstromes im MSF-Verfahren. Aus diesem Grund ist der Fallfilmverdampfer in den letzten Jahren verstärkt in den Mittelpunkt des Interesses gerückt. Im Gegensatz zur MSF-Anlage ist der Energiebedarf praktisch nur von der Stufenzahl abhängig, die allerdings wegen der erforderlich endlich Temperaturrohrdifferenz in einer Stufe begrenzt ist. Die Entwicklung geht vor allem dahin, durch besondere Formgebung der Rohre einen möglichst hohen Wärmedurchgang zu erzielen und daher an Fläche und Investitionskosten zu sparen.

In Bild 11 ist der Energiebedarf für das Verfahren der Entspannungsverdampfung mit dem für Fallfilmverdampfung verglichen. Er ist für das Verfahren der Fallfilmverdampfung deutlich geringer als für das MSF-Verfahren, allerdings sind für Fallfilmverdampfung derzeit die Investitionskosten noch höher, was sich aber möglicherweise in Zukunft zugunsten der Fallfilmverdampfung ändern kann. Ein anderer Verdampfungsprozeß ist die Brüdenverdichtung. Hier wird in einem Behälter mit zirkulierender Sole ein Unterdruck erzeugt, so daß ein Teil der Flüssigkeit verdampft. Der aufsteigende Dampf wird verdichtet und dabei überhitzt. Er kondensiert in einem Wärmeaustauscher, erhitzt dabei eine zirkulierende Sole und wird anschließend als Destillat abgeleitet. Ein weiteres Verdampfungsverfahren ist das Vakuumgefrieren. Dabei wird vorgekühltes Wasser in eine Kammer eingesprüht, in der ein Unterdruck von 3 Torr herrscht. Beim Eintritt in die Kammer verdampft ein Teil des Wassers, wodurch sich das restliche Wasser so weit abkühlt, daß Eisbildung einsetzt. Sole und Eiskristalle werden anschließend in einem zweiten Behälter gefördert, in dem das aufschwimmende Eis mit Frischwasser gewaschen und abgezogen wird. Das Eis wird dann geschmolzen und kühlt hierbei das ankommende Rohwasser. Kleinere Anlagen arbeiten bereits nach diesem Verfahren. Allerdings bereitet bisher die Entfernung der Sole, die zwischen den Süßwasserkristallen eingeschlossen ist, so erhebliche Schwierigkeiten, daß dadurch die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens in Frage gestellt war. Indessen kann man erwarten, daß diese Schwierigkeiten durch weitere Entwicklungsarbeiten behoben werden können und damit das Gefrierverfahren durchaus mit den anderen Verdampfungsverfahren konkurrieren kann.

5.3 Membranverfahren und Ionenaustausch

Grundlage der Membranverfahren sind der Ionenaustausch und die umgekehrte Osmose. Eines der wichtigsten Verfahren ist die Elektrodialyse. Hierbei verwendet man, wie *Bild 12* schematisch zeigt, hintereinander geschaltete Plättchen von etwa 0,2 mm Dicke. Diese besitzen die Eigenschaft, bei Berührung mit einer Salzlösung den Strom elektrolytisch zu leiten, wobei sie entweder nur positiv oder nur negativ geladene Ionen durchlassen. Wie man aus *Bild 12* erkennt, können beim Stromdurchgang in der vorgegebenen Richtung die Ionen aus der Mittelzelle des Apparates in die äußeren Zellen austreten, es können jedoch keine Ionen von dort in die Mittelzelle gelangen. Die Lösung in der Mittelzelle wird also nach einiger Zeit salzfrei sein. In wirklichen Apparaten sind viele Zellen hintereinandergeschaltet. Die Apparate brauchen nur wenig Platz und enthalten keine beweglichen Teile, und auch die Lebensdauer der Membranen ist hinreichend groß. Allerdings steigt die elektrische Energie stark mit zunehmendem Salzgehalt des Rohwassers, so daß das Verfahren nur für geringe Salzgehalte des Rohwassers wirtschaftlich ist. Praktisch wird die Elektrodialyse daher nur bei Salzgehalten unter 1‰ angewandt.

Bei der umgekehrten Osmose oder Hyperfiltration bestehen die Membranen vielfach aus Acetylcellulose-Folien. Das Membran-Material besitzt die Eigenschaft, sich mit Wasser so vollzusaugen, daß die Benetzung einer chemischen Bindung nahekommt. Wird nun auf die Membran ein Druck ausgeübt, so werden die Wassermoleküle in der Membran frei beweglich. Man kann sie hindurchschieben wobei jedes abwandernde Wassermolekül durch ein nachfolgendes ersetzt wird. Die Membran ist durchlässig für Wasser, aber undurchlässig für das im Wasser gelöste Salz. Man nennt sie bekanntlich semipermeabel. Bringt man nun Süßwasser auf die eine und salzhaltiges Wasser auf die andere Seite einer solchen semipermeablen Membran, so beobachtet man die als Osmose bekannte Erscheinung, *Bild 13*, bei der sich die Konzentrationsunterschiede auf beiden Seiten dadurch auszugleichen suchen, daß sich das Salzwasser auf der einen Seite mit dem Süßwasser auf der anderen Seite solange anreichert, bis sich der osmotische Druck und der Überdruck im Salzwasser, der das Wasser wieder zurückzudrängen sucht, gerade ausgleichen. Setzt man nun die Salzlösung, wie im rechten Teil von *Bild 13* angedeutet, unter einen höheren Druck als den osmotischen, so kehrt sich die Osmose um, indem reines Wasser aus der Salzlösung durch die Membran geschoben wird. Man spricht von umgekehrter Osmose. Ihr Vorteil besteht darin, daß kein Temperaturgefälle erforderlich ist und daß die Anlage recht billig ist. Nachteilig ist, daß die semipermeablen Membranen von dem durchströmenden Wasser langsam zersetzt und wirkungslos werden. Bei diesem Vorgang werden Acetylgruppen durch Hydrolyse

abgespalten, was man durch Ansäuern des Wassers verlangsamen kann. Neuerdings haben allerdings verschiedene Firmen Membranen mit hinreichend langer Standzeit entwickelt, so daß das Verfahren der umgekehrten Osmose dem der Elektrodialyse überlegen ist und sich künftig noch mehr durchsetzen wird. Insbesondere eignet sich die umgekehrte Osmose für die Reinigung von Brackwasser. Dort wird ein Druck von etwa 40 bar benötigt, wohingegen Entsalzung von Meerwasser mehr als 100 bar erforderlich macht. Der Energiebedarf ist mit 3 bis 5 kwh sehr viel geringer als derjenige der Verdampfungsverfahren. Diese Energie muß allerdings als elektrische oder mechanische aufgebraucht werden, während man bei den Verdampfungsverfahren die billigere thermische Energie nutzen kann. Dennoch wird man dem Verfahren der umgekehrten Osmose wegen seiner Einfachheit und seines geringen Energiebedarfs einen großen Anwendungsbereich für die Brackwasserentsalzung voraussagen dürfen.

6. Entwicklungstendenzen und Ausblick

Vergleicht man die verschiedenen Verfahren miteinander, so kann man sagen, daß die Entspannungsverdampfung zur Meerwasserentsalzung eine ausgereifte und nur noch in mühsamer Detailarbeit verbesserungsfähige Technik darstellt. Verbesserungen werden vor allem im Hinblick auf die Kombination verschiedener Verfahren, beispielsweise der Kombination von Verfahren der Fallfilmverdampfung mit denen der Entspannungsverdampfung, möglich sein. Man nennt derartige Kombinationen, wie der Rosenzüchter das Ergebnis erfolgreicher Kreuzungen verschiedener Rosensorten, Hybrid-Systeme. Ein anderes aussichtsreiches Hybrid-Verfahren scheint die Kombination von mehrstufiger Entspannungsverdampfung, Brüdenverdichtung und Kreislaufverdampfung zu sein. Dabei wird dem Problem der Verkrustung und Korrosion der Apparate besondere Aufmerksamkeit zu schenken sein. Auch die Gefrierverfahren sind noch entwicklungsfähig.

Wegen des hohen Kostenanteils der Verdampferheizflächen bei den Verfahren der Entspannungsverdampfung — sie betragen etwa 50% der gesamten Anlagekosten — wird man vor allem bedacht sein, mit kleineren Heizflächen auszukommen. Leider muß man gerade bei den Verdampfungsverfahren wegen der enormen Korrosivität des Meerwassers für viele Bauteile, besonders für solche, die nicht leicht auszuwechseln sind, teure Werkstoffe verwenden. Daß man hierbei, wie häufig in der Technik und wohl im Leben überhaupt, einen Kompromiß zwischen widersprüchlichen Forderungen finden muß, zeigen die folgenden Überlegungen. Um die Korrosion zu mildern, ist es wichtig, die Konzentration des gelösten Sauerstoffs gering zu halten. Andererseits begünstigt aber ein ge-

ringer Anteil gelöster Gase die Entspannungsverdampfung. Um mit möglichst wenig Energie auszukommen, strebt man, wie schon zuvor gezeigt, hohe Temperaturen an. Dadurch vergrößert sich aber die Korrosionsgeschwindigkeit in Kohlenstoffstählen erheblich. Sie verdoppelt sich in entgastem Meerwasser bei einem Temperaturanstieg von 70°C auf 100°C. Will man Material sparen, so wird man die Apparate klein bauen. Dies hat aber höhere Strömungsgeschwindigkeiten in den Apparaten und damit eine verstärkte Erosionskorrosion durch mitgeschleppte Sandteilchen, durch elektrochemische Auswaschungen und durch Kavitation zur Folge. Um wenig Chemikalien für die Wasseraufbereitung einsetzen zu müssen, ist es üblich, die aufbereitete Sole mehrfach umzupumpen. Da die Sole aber auf höhere Konzentration eingedickt ist, steigt damit ihre elektrische Leitfähigkeit, was die Korrosion beschleunigt. In all den genannten Fällen wird man optimale Lösungen suchen müssen.

Was ist nun durch die bisher geleistete vielfältige Forschungs- und Entwicklungstätigkeit erreicht worden? In der Tat hat man Verfahren entwickelt, von denen hier die wichtigsten geschildert wurden, mit denen man Brackwasser reinigen und den ursprünglichen Salzgehalt des Seewassers von etwa 3,5% auf etwa den hundertsten Teil erniedrigen kann, so daß das Wasser für den Menschen, für industrielle oder landwirtschaftliche Zwecke nutzbar wird. Die Kosten für das erzeugte Wasser liegen derzeit noch bei etwa DM 1.— je m³, einem Preis, den man in einigen großen Städten zwar schon für konventionelles Trinkwasser zahlt, der aber entschieden zu hoch für die Bewässerung landwirtschaftlich genutzter Flächen ist. Optimistischere Schätzungen von Erfindern und Konstrukteuren führen auf einen Preis von DM -,50 je m³, der sicher in einigen Jahren erreichbar sein wird und damit durchaus in Konkurrenz treten kann zu dem heute üblichen mittleren Preis von etwa DM -,40 je m³. An vielen Orten der Erde wird heute bereits Trinkwasser aus Meerwasser erzeugt, und der Bedarf ist in den nächsten Jahren gewaltig, so gewaltig, daß man der Industrie, die sich mit der Trink- und Brauchwassererzeugung befaßt, erhebliche Wachstumsraten prophezeien kann. Dennoch sind wir von dem Endziel, Wasser für die landwirtschaftliche Bewässerung und auch für die energieerzeugende Industrie zu einem Preis, der nicht viel mehr als DM -,10 bis DM -,12 je m³ betragen darf, weit entfernt. Vermutlich wird man sich diesem Ziel nur in zäher mühevoller Kleinarbeit nähern, wenn nicht entscheidende neue Gedanken zu einem Durchbruch führen. Es wird erheblicher Investitionen in die Forschung bedürfen, um das angestrebte Ziel zu erreichen. Und obwohl gegenwärtig für die Entwicklung der Entsalzungsverfahren in fast allen industrialisierten Ländern beachtliche Mittel bereitgestellt werden, bleibt die bange Frage, ob die hohe Wachstumsrate der Erdbevölkerung nicht alle Anstrengungen zunichte macht. Der Wasserverbrauch für

die bewässerten Landflächen beträgt heute täglich etwa 1.300 Liter je Erdbewohner. Der rasche Anstieg der Weltbevölkerung wird dazu zwingen, noch mehr bebaubares Land in den ariden und semiariden Gebieten zu kultivieren, was zu einer gewaltigen Zunahme des Wasserbedarfs führt, der nach BERGERON (Monop. Amer. Geophys. Union 5, 1060, S. 399) bis zum Ende dieses Jahrhunderts auf das 20-fache des heutigen Verbrauchs ansteigen müßte. Für eine Entsalzung in dieser Größenordnung sind natürlich gewaltige Energiemengen erforderlich. Auch aus dieser Sicht sind das Problem der Wassergewinnung und der Energieerzeugung eng miteinander gekoppelt. Angesichts des zu erwartenden Bevölkerungswachstums in vielen Ländern der Erde, insbesondere in den Entwicklungsländern, wird man ohne erheblichen technischen und organisatorischen Einsatz eine Wasserverknappung mit allen ihren Folgen nicht vermeiden können. Diese hier auf uns zukommende Aufgabe kann nicht allein in den Entwicklungsabteilungen der Industrie und von Forschern gelöst werden. Es ist ebenso notwendig, daß von der Politik her rechtzeitig globale Steuerungsmechanismen in Gang gesetzt werden, um die auf uns zukommenden Probleme bewältigen zu können.

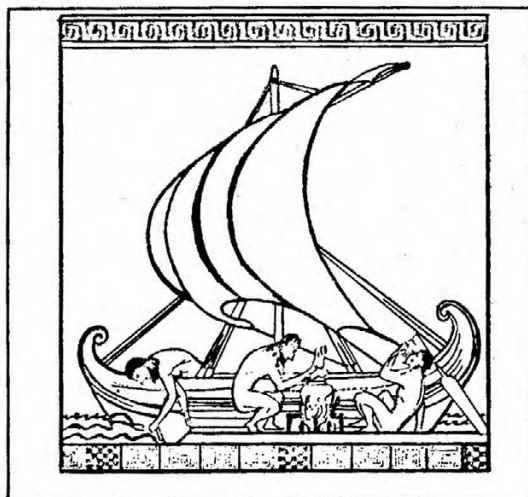


Bild 1: Gewinnung von Trinkwasser

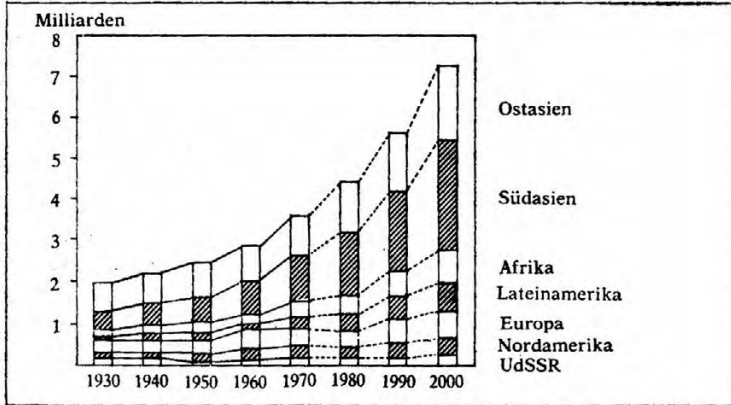


Bild 2: Zunahme der Erdbevölkerung

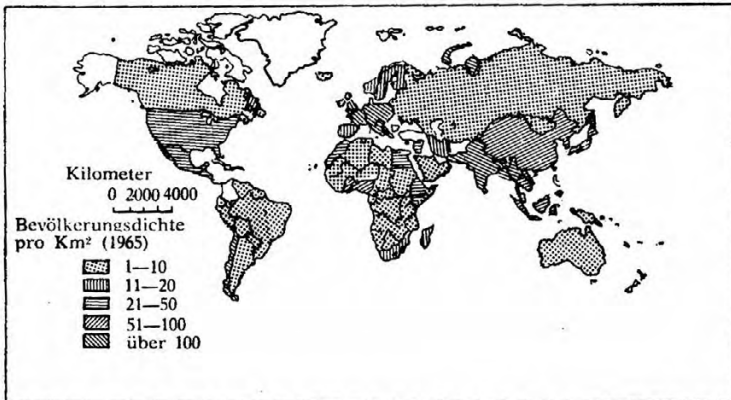


Bild 3: Bevölkerungsdichte pro km² (1965)

Wasservorkommen insgesamt. $1,4 \cdot 10^{18} \text{m}^3$

Davon Meerwasser 98,3%

Süßwasser 1,7%, hiervon 97% als Eis

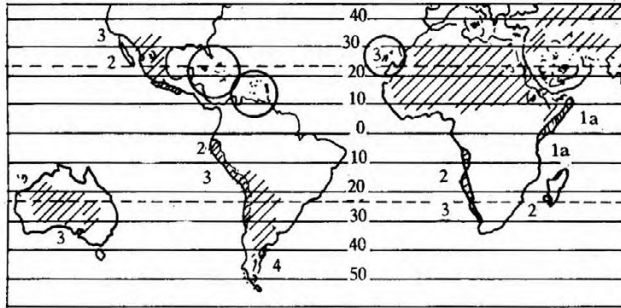


Bild 4: Wasservorkommen der Erde

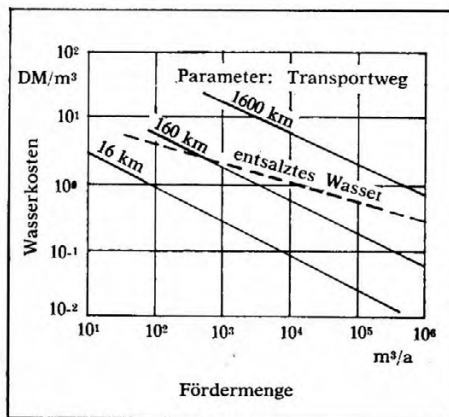


Bild 5: Wasserkosten für Filtration und Transport

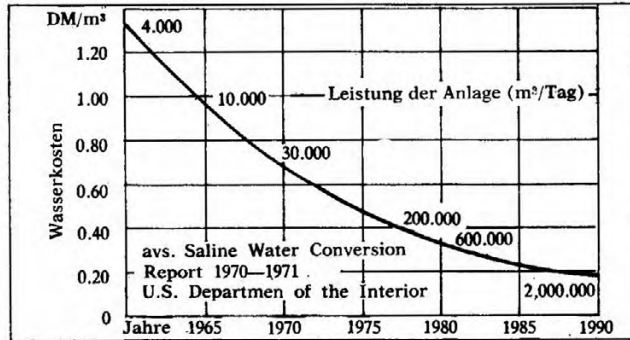


Bild 6: Voraussichtliche Entwicklung des Preises von entsalztem Meerwasser

Verfahren mit Änderung des Aggregatzustands	Verfahren ohne Änderung des Aggregatzustands
1. Destillation Verdampfung mit Sonnenenergie Verdampfer mit senkrechten Rohren Verdampfer mit waagrechten Rohren Vielstufige Entspannungsverdampfung Brüdenkompression 2. Kristallisation Gefrierverfahren Hydratverfahren	1. Membranverfahren und Ionenaustausch Ionenaustausch Elektrodialyse Piezodialyse Elektrochemische Prozesse Biologische Prozesse 2. Flüssig-flüssig Extraktion

Bild 7: Einteilung der wichtigsten Entsalzungsverfahren

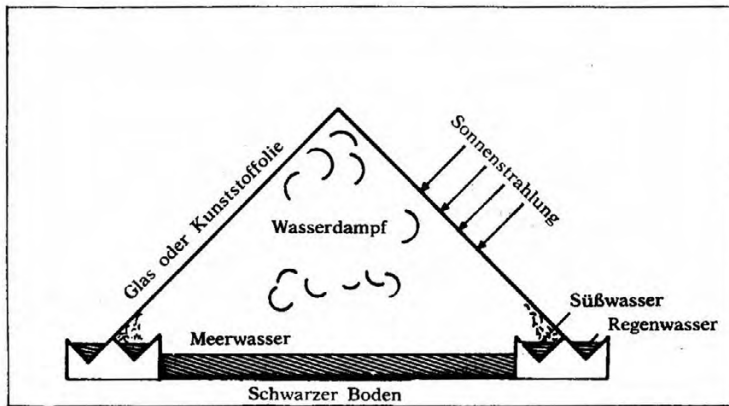


Bild 8: Verdunstungsanlage

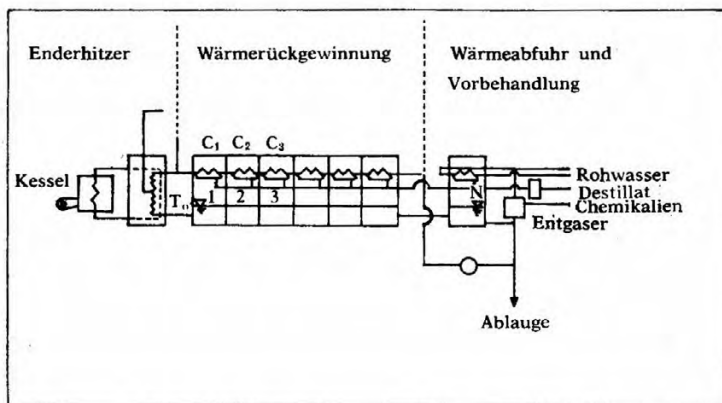


Bild 9: Schema einer mehrstufigen Entspannungsverdampferanlage

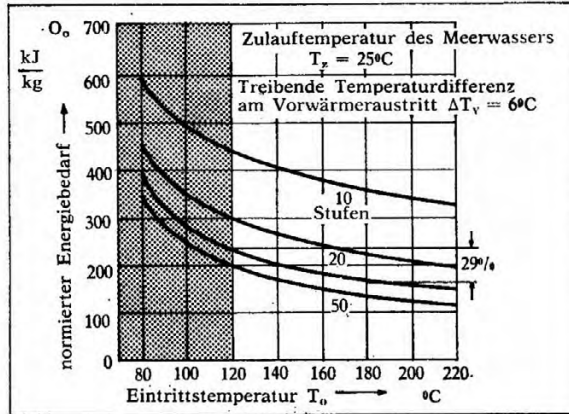


Bild 10: Energiebedarf eines Entspannungsverdampfers

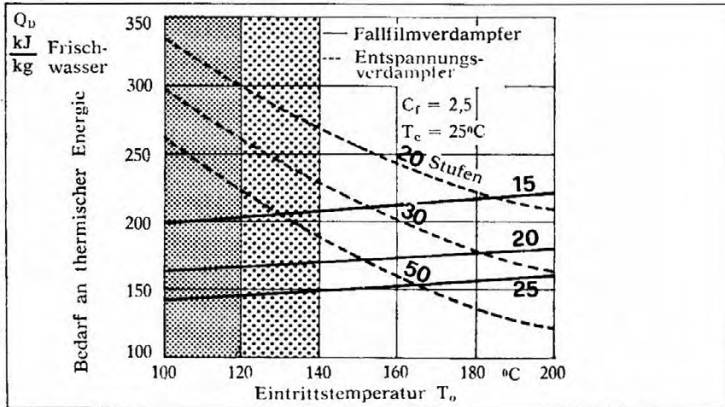


Bild 11: Energiebedarf eines Fallfilmverdampfers im Vergleich mit einem Entspannungsverdampfer

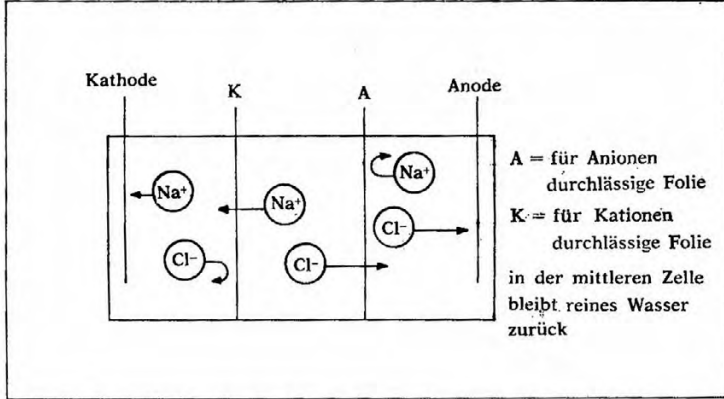


Bild 12: Schematische Darstellung der Elektrodialyse

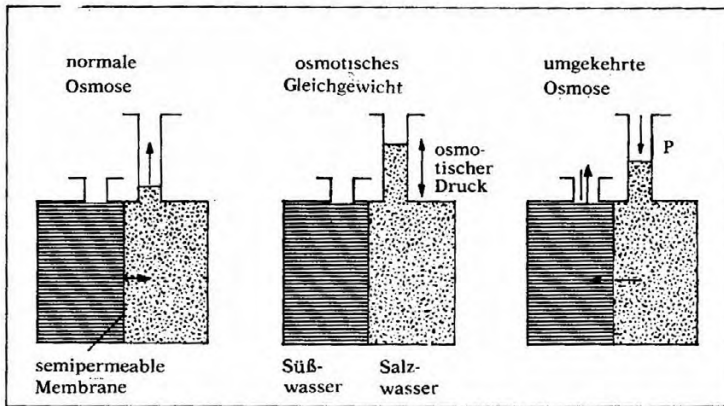


Bild 13: Prinzip der umgekehrten Osmose

