

VDI

Technologiezentrum

Wasserknappheit & Technologie

Übersichtsstudie



Vera Grimm, Christoph Glauner, Heinz Eickenbusch,
Axel Zweck

Im Auftrag des

VDI



Zukünftige Technologien Consulting

Übersichtsstudie Wasserknappheit & Technologie

Vera Grimm, Christoph Glauner, Heinz Eickenbusch und Axel Zweck

Herausgeber:
Zukünftige Technologien Consulting
des VDI-Technologiezentrums
Airport City
Postfach 10 11 39
40002 Düsseldorf

im Auftrag des VDI e.V.

Diese Publikation entstand im Rahmen des Vorhabens „Themenmonitoring für den VDI“ der Abteilung Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH im Auftrag des VDI e. V.

Durchführung: Dr. Vera Grimm
Christoph Glauner
Dr. Heinz Eickenbusch
Dr. Dr. Axel Zweck

Kontakt: Vera Grimm (grimm@vdi.de)

Dank gilt einer Vielzahl von Experten, die wertvolle Beiträge und Anregungen geliefert haben. Gabi Hennecke und Andrés Freese gilt Dank für die organisatorische und redaktionelle Unterstützung bei der Durchführung der Studie.

Zukünftige Technologien Nr. 76
Düsseldorf, im November 2008
ISSN 1436-5928

Die vorliegende Studie wurde im Zeitraum April 2006 bis August 2006 angefertigt und im Juli 2008 aktualisiert. Für den Inhalt zeichnen die Autoren verantwortlich. Die geäußerten Auffassungen stimmen nicht unbedingt mit der Meinung des VDI e. V. überein.

Außerhalb der mit dem Auftraggeber vertraglich vereinbarten Nutzungsrechte sind alle Rechte vorbehalten, auch die des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen photomechanischen Wiedergabe (Photokopie, Mikrokopie) und das der Übersetzung.

Titelbild: Tropfender Wasserhahn. (Quelle: BMU / Brigitte Hiss)

Zukünftige Technologien Consulting (ZTC)
des VDI-Technologiezentrums

Airport City
Postfach 10 11 39
40002 Düsseldorf

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|---|----|
| INHALTSVERZEICHNIS | 5 |
| ZUSAMMENFASSUNG | 8 |
| 1 EINLEITUNG UND DEFINITION | 13 |
| 2 WASSERKNAPPHEIT - URSACHEN UND HERAUSFORDERUNGEN | 15 |
| 2.1 Ursachen | 15 |
| 2.1.1 Natürliche Verteilung und Erneuerung von Wasserressourcen | 15 |
| 2.1.2 Ressourcen(über)nutzung | 17 |
| 2.1.3 Wasserverschmutzung | 21 |
| 2.1.4 Großbauprojekte, anthropogene Eingriffe und Wassertransport | 26 |
| 2.1.5 Klimaänderungen | 28 |
| 2.1.6 Weitere Ursachen für Wasserknappheiten | 30 |
| 2.2 Politische und sozioökonomische Auswirkungen | 30 |
| 2.2.1 Auswirkungen von Wasserknappheiten | 30 |
| 2.2.2 Gemeinsame Nutzung von Wasser | 33 |
| 2.2.3 Politische Entwicklungen | 33 |
| 2.3 Exkurs: Konzept des virtuellen Wassers | 34 |
| 2.4 Herausforderungen | 35 |
| 3 STRATEGIEN UND TECHNOLOGISCHE BEITRÄGE | 37 |
| 3.1 Minimierung des Wasserverbrauchs | 37 |
| 3.1.1 Prozess- und Produktionsintegrierte Maßnahmen | 37 |
| 3.1.2 Ersatz von Trinkwasser durch Betriebswasser | 43 |
| 3.1.3 Kommunale Infrastrukturmaßnahmen | 45 |
| 3.1.4 Optimierungspotenziale in der Landwirtschaft | 48 |
| 3.1.5 Verbrauchsarme Geräte und Sanitärinstallationen | 52 |
| 3.1.6 Trends und aktuelle Projekte | 55 |
| 3.2 Maximierung der Verfügbarkeit | 58 |
| 3.2.1 Gewässerschutz, Staudämme, Klimaschutz | 58 |
| 3.2.2 Anreicherung und Reinigung von Grundwasser | 59 |
| 3.2.3 Grauwasserrecycling | 62 |
| 3.2.4 Abwasserrecycling | 64 |
| 3.2.5 Alternative Wassersysteme | 65 |
| 3.2.6 Trends und aktuelle Projekte | 66 |
| 3.3 Technologien zur Wasseraufbereitung und Wassergewinnung | 69 |
| 3.3.1 Abwasserbehandlung | 69 |
| 3.3.2 Technische Methoden in der Abwasserbehandlung | 71 |
| 3.3.3 Membrantechnologien | 73 |
| 3.3.4 Nanotechnologien | 76 |
| 3.3.5 Analytische Methoden - Sensorik | 78 |
| 3.3.6 Trinkwasseraufbereitung | 78 |
| 3.3.7 Wasserentsalzung | 80 |
| 3.3.8 Wasser aus Luft | 83 |
| 3.3.9 Trends und aktuelle Projekte | 84 |
| 4 MARKTPOTENZIAL | 87 |
| 4.1 Trends und Potenziale auf dem Wassermarkt | 87 |
| 4.2 Exportchancen für deutsche Unternehmer | 91 |

| | | |
|---|-------------------------------------|-----|
| 5 | AUSBLICK | 95 |
| | GLOSSAR UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS | 97 |
| | ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS | 101 |
| | LITERATURVERZEICHNIS | 103 |

ZUSAMMENFASSUNG

Nie wurde mehr Wasser verbraucht als heute, obwohl immer weniger sauberes Wasser zur Verfügung steht. Schon heute leiden ca. 1,3 Milliarden Menschen weltweit an Wasserknappheit mit vielen negativen Folgen für Gesundheit und Lebensqualität – Tendenz steigend. Die Ursachen für Wasserverknappungen sind vielfältig – einige Beispiele sind die ungleiche Verteilung der Ressource Wasser, die zunehmende Verschmutzung der Gewässer, das Bevölkerungswachstum, anthropogene Eingriffe und Großbauprojekte sowie Klimaänderungen, aber auch ökonomische und institutionelle Faktoren spielen eine wesentliche Rolle. Der Wert von Wasser wird im Verhältnis zu seiner lebensnotwendigen Bedeutung oft nicht realisiert und der Endnutzer – vor allem in der Landwirtschaft – ist sich der realen Kosten für eine nachhaltige Bewirtschaftung der Ressource Wasser nicht bewusst.

Zu den zentralen Herausforderungen der Menschheit in diesem Jahrhundert gehören daher: die nachhaltige Versorgung der Weltbevölkerung mit Trink- und Brauchwasser, die Reduktion der Gewässerverschmutzung und die Sicherung der Wasserkreisläufe. Mit der Lösung der Wasserproblematik können auch weitere Problemfelder, wie Armut, Hunger, Krankheiten und Umweltbelastungen gemildert werden. Wasser spielt auch für die Energieversorgung eine elementare Rolle und wird hierfür in immer größerer Menge benötigt.

Neben politischen, ökonomischen und institutionellen Lösungsansätzen spielen insbesondere technologische Innovationen eine wichtige Rolle bei der Erreichung dieser Ziele. Es lassen sich grob drei Strategien formulieren, die unterschiedliche technologische Ansätze erfordern und an unterschiedlichen Stellen der Wertschöpfungskette ansetzen: die Minimierung des Wasserverbrauchs, die Maximierung der Wasserverfügbarkeit und Technologien zur Wasseraufbereitung bzw. -gewinnung.

Minimierung des Wasserverbrauchs:

Im Sinne eines nachhaltigen Umgangs mit der Ressource Wasser sollte es, unabhängig von seiner Qualität, eingespart oder seine Verwendung im Idealfall gänzlich vermieden werden.

Im industriellen Umfeld spielen vor diesem Hintergrund prozess- und produktintegrierte Maßnahmen eine wichtige Rolle. Kerngedanken sind u. a. die Trennung von Teilströmen, die stoffstromspezifische Abwasserbehandlung, die Kreislaufführung, die Lebensdauerverlängerung, die Substitution alter Prozesse durch neue oder der Ersatz von Wasser als Lösungsmittel z. B. durch überkritische Fluide.

Eine ganze Reihe von Ansatzpunkten für eine Optimierung des Wasserverbrauchs und eine Reduktion der Gewässerbelastung bietet sich in der Landwirtschaft als Nahrungs- und Energielieferant an. Diese gilt als Hauptverbraucher von Wasser und als Hauptverursacher von hohen Schadstoffeinträgen durch Dünger und Pestizide. Beispielsweise haben moderne Bewässerungsverfahren Wirkungsgrade von bis zu 95 % und können alte, ineffiziente Bewässerungsanlagen mit hohen Wasserverlusten, wie z. B. offene Kanäle, ablösen. Sensornetzwerke können die Bewässerung weiter optimieren, indem sie verschiedene Parameter wie Bodenfeuchte und Temperatur automatisch erfassen, an einen zentralen Server weiterleiten und dieser daraus Bewässerungsmuster und Düngezeiten errechnet. Auch die sensor- und satellitengestützte teilflächenspezifische Landwirtschaft (precision farming) führt zu Einsparungen von Betriebsmitteln und erlaubt eine exaktere Nutzung der landwirtschaftlichen Flächen. Darüber hinaus können neuartige Wasserspeichermaterialien, so genannte Superabsorber, für eine optimierte Bewässerung sorgen. Die Materialien werden im Wurzelbereich der Pflanzen ausgebracht und können derart die Pflanzen ohne große Verdunstungs- oder Versickerungsverluste mit Wasser versorgen.

Nanotechnologische Innovationen in der Landwirtschaft tragen ebenfalls zu einem verringerten Bedarf an Pflanzenbehandlungsmitteln bei. Düngemittel können in Nanokapseln oder nanoskalige Käfige (nanodevices) eingeschlossen und anschließend ausgebracht werden. Ihre Wirkung entfaltet sich idealerweise erst am Zielort. Auch aus der Bio- und Gentechnik sind weitere Innovationen zu erwarten; Themen wie die Stickstofffixierung aus der Luft oder die Stresstoleranz von Pflanzen werden intensiv beforscht.

Im privaten Haushalt spielt das Verbraucherverhalten eine wichtige Rolle im Umgang mit der Ressource Wasser. Verbrauchsarme Installationen, z. B. Spartoiletten im Sanitärbereich, werden immer populärer, auch sparsame Haushaltsgeräte, wie Wasch- und Spülmaschinen, sind gefragt.

Die Sanierung von überalterten, maroden Rohrleitungssystemen, die weltweit zu großen Verlusten beim Wassertransport führen, ist eine Aufgabe fast aller industrialisierte Nationen. Die grabenlose Rohrsanierung, bei der aufwändige und teure Grabungsarbeiten nicht notwendig sind, hat sich zunehmend durchgesetzt.

Maximierung der Verfügbarkeit

Nur wenn die Wasserreserven rechtzeitig regeneriert werden und für den Erhalt der Wasserkreisläufe gesorgt wird, kann die Ressource Wasser langfristig genutzt werden. Leitgedanken dieses Strategieansatzes sind alle Maßnahmen, die zu einer besseren Verfügbarkeit von Wasser führen. Dazu gehört z. B. ein funktionierender Gewässer- und Klimaschutz, aber

auch die gezielte Anreicherung und Sanierung von Grundwasser. Dieses dient weltweit als Hauptquelle für sauberes Trinkwasser. Vermehrte Schadstoffeinträge belasten das Grundwasser, und übermäßige Wasserentnahmen führen zum Absenken des Grundwasserpegels. Die möglichen Folgen reichen vom Eindringen von Salzwasser in küstennahen Regionen bis zum Absenken des Erdreichs. Wasser wird daher gezielt versickert um die natürlichen Grundwasserreserven zu regenerieren und den Grundwasserpegel anzuheben. Luftgestützte Geo-Sensoren dienen der Überwachung von Erdbewegungen, so dass ein Absenken des Bodens frühzeitig registriert werden kann. Zur Grundwassersanierung wird auch den Nanotechnologien großes Potenzial zugeschrieben. Besonders Nanopartikel aus nullwertigem Eisen und Eisenverbindungen sowie TiO₂- oder MnO₂-Nanokatalysatoren werden bereits erfolgreich eingesetzt.

Ein weiterer Ansatzpunkt zur Erhöhung der Wasserverfügbarkeit ist die direkte Wieder- bzw. Weiterverwendung von „benutztem“ Wasser, wie z. B. beim Grauwasserrecycling. Hierbei wird nur leicht verschmutztes häusliches Abwasser nach einer groben Reinigung für die Toilettenspülung oder die Parkbewässerung benutzt. Das Recycling von Abwasser als Ganzes und die direkte Verwendung des recycelten Abwassers zur Bewässerung, für die Toilettenspülung oder die Grundwasseranreicherung wird insbesondere in Japan praktiziert.

In ärmeren und infrastrukturschwächeren Ländern bieten sich dezentrale Lösungen für die Wasserver- und -entsorgung an. Die örtlichen Umstände erfordern mitunter flexible, an die jeweilige Lage angepasste, technische Lösungen, um die Wasserverfügbarkeit zu erhöhen.

Technologien zur Wasseraufbereitung und Wassergewinnung

In den meisten industrialisierten Ländern werden häusliche und industrielle Abwässer in zentralen Kläranlagen gereinigt und anschließend den natürlichen Ressourcen wieder zugeführt. Eine weitere Nutzung erfolgt nur indirekt über Uferfiltrat oder das Grundwasser.

Verschiedene physikalische, chemische und biologische Techniken finden in der Abwasserbehandlung Verwendung. Von besonderer Bedeutung sind in diesem Zusammenhang Membranverfahren zur Filtration von Partikeln verschiedenster Größe. Membrantechnologien werden als Schlüsseltechnologie angesehen, denn sie sind vielfältig einsetzbar: von der Abwasserbehandlung über die Trinkwasseraufbereitung bis zur Wasserentsalzung. Innovative Weiterentwicklungen der relativ kostenintensiven Membranverfahren führen zu stetig fallenden Produktionskosten und höheren Lebensdauern. Membranen haben aufgrund von Verstopfung der Poren (Scaling, Biofouling) oder Alterung nur eine begrenzte Lebensdauer.

Nanoporöse Membranen können pathogene, anorganische und organische Substanzen aus dem Wasser filtern und kommen in vielen Bereichen zum Einsatz. Membranen mit regelmäßig angeordneten Kohlenstoffnanoröhren zeichnen sich durch besondere Durchflusseigenschaften aus und könnten die Wasserentsalzung kostengünstiger machen.

Zur (Grund-)Wassersanierung und der Eliminierung von Schadstoffen kommen nanoskalige Photokatalysatoren aus TiO_2 oder anderen Materialien zum Einsatz. In Verbindung mit Licht entwickeln diese eine bakterizide Wirkung und können auch als Beschichtung eingesetzt werden. Magnetischen Nanopartikeln wird großes Potenzial in der Grundwassersanierung und bei der Beseitigung von Schwermetallen zugesprochen. Schließlich dienen innovative Nano-Sensoren – neben zahlreichen anderen analytischen Verfahren – zur Detektion von Schadstoffen und zur Überwachung der Gewässergüte.

Zur Desinfektion von Trinkwasser kommen neben der Chlorung neuere Verfahren zum Einsatz, wie z. B. die Bestrahlung mit UV-Licht. Die Entkeimung mit UV-Licht hat sich als effektiv erwiesen und ist auch für mobile Anwendungen einsetzbar. Als UV-Quelle spielen, neben den typischerweise verwendeten Quecksilberdampflampen, Galliumnitrid-Leuchtdioden eine wichtige Rolle.

Die Entsalzung von Meer- oder Brackwasser dient der Gewinnung von sauberem Trinkwasser. Etwa 15.000 Meerwasserentsalzungsanlagen werden derzeit in mehr als 125 Ländern genutzt, um rund 38 Millionen Kubikmeter Trinkwasser am Tag zu produzieren. In Ländern mit geringen natürlichen Wasservorkommen, aber mit Meerzugang, stellt die Entsalzung eine der wichtigsten Optionen der Süßwassergewinnung dar. Die gängigen Verfahren der Entsalzung (Verdampfung und Umkehrosmose) sind jedoch sehr kostenintensiv, da sie einerseits viel Energie benötigen und andererseits auch mit hohen Instandhaltungskosten verbunden sein können. Neue Techniken, alternative Energien und moderne Membrantechnologien können jedoch schon heute zur preiswerten Gewinnung von Trinkwasser beitragen.

Eine Analyse des Marktpotenzials zeigt deutliche Wachstumsraten, u. a. bei den Membranverfahren, der Wasserentsalzung, der Biotechnologie und in den Nanotechnologien. Nanotechnologien wird ein besonders großes Potenzial eingeräumt. Die ersten Produkte, wie z. B. nanoporöse keramische Filtermembranen sind bereits auf dem Markt. Biotechnologische Prozesse entwickeln sich zu echten Alternativen klassischer Produktionsprozesse und sind häufig auch ökologisch sinnvoller.

Zukünftige Märkte im Wassersektor werden in Asien, insbesondere in China und Indien zu finden sein. Beide Länder weisen einen hohen Verschmutzungsgrad der Oberflächengewässer auf, aus denen bereits

heute Gefahrenpotenzial für die Bevölkerungen erwächst. Die VR China hat den Schutz der Umwelt für sich entdeckt und fördert umweltrelevante Techniken in den kommenden Jahren mit 175 Milliarden US-\$ – deutsche Technik, z. B. für Kläranlagen, ist sehr gefragt. Hier bestehen gute Exportchancen für deutsche Unternehmen, trotz großer Konkurrenz.

Fazit: Die Problematik der globalen Wasserknappheit ist von hohem politischem, ökonomischem und ökologischem Interesse, denn die Versorgung der Weltbevölkerung mit sauberem Trink- und Brauchwasser wird auch zukünftig eine zentrale Herausforderung an die Menschheit sein. Innovative Technologien können und müssen hier einen wichtigen Beitrag leisten.

1 EINLEITUNG UND DEFINITION

Derzeit haben 1,1 Milliarden Menschen, also etwa ein Fünftel der Weltbevölkerung, keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser; südlich der Sahara ist jeder zweite Mensch davon betroffen [BMZ 2005]. Allgemein wird von Wasserknappheit gesprochen, wenn Wasser entweder nicht in ausreichender Menge und/oder nicht in ausreichender Qualität zur Verfügung steht.

Ein Fünftel der Weltbevölkerung hat kein sauberes Trinkwasser

Eine exakte Definition des Begriffs Wasserknappheit ist kaum möglich, denn er steht für ein Konzept, das mit regionalen, ökonomischen und sozialen Bedingungen in Beziehung steht. Ein gebräuchlicher, von hydrologischer Seite entwickelter, Indikator für Wasserknappheit orientiert sich an der Relation von Bevölkerungszahl zu verfügbarer Menge an erneuerbarem Wasser. Unterschreitet die Menge an Wasser, die jeder Person pro Jahr zur Verfügung steht, die empirische Grenze von 1.700 m³, wird von Wasserknappheit gesprochen. Steht jeder Person sogar weniger als 1.000 m³ Wasser im Jahr zu, ist das Land von Wassermangel betroffen (vgl. Tabelle 1). Nach dieser Definition herrscht derzeit in mehr als 20 Ländern weltweit Wassermangel und bis zum Jahr 2025 werden Prognosen zufolge mindestens dreizehn weitere betroffen sein [Geyer 2006]. Zu den an Wasserknappheit leidenden Ländern gehören auch Europäische Staaten, wie z. B. Polen, Belgien und Großbritannien [Richter 2005].

Weltweiter Wassermangel in mehr als 20 Ländern

Tabelle 1: Grenzen für Wasserknappheit und Wassermangel

| | Menge an Wasser [m ³] pro Person und pro Jahr |
|---|--|
| Wasserknappheiten liegen nur selten vor und sind lokal begrenzt | > 1.700 |
| Wasserknappheit | 1.000 - 1.700 |
| Wassermangel (Gesundheitsbedingungen und Wirtschaft deutlich beeinflusst) | 500 - 1.000 |
| extremer Wassermangel (lebensbedrohliche Ausmaße) | < 500 |

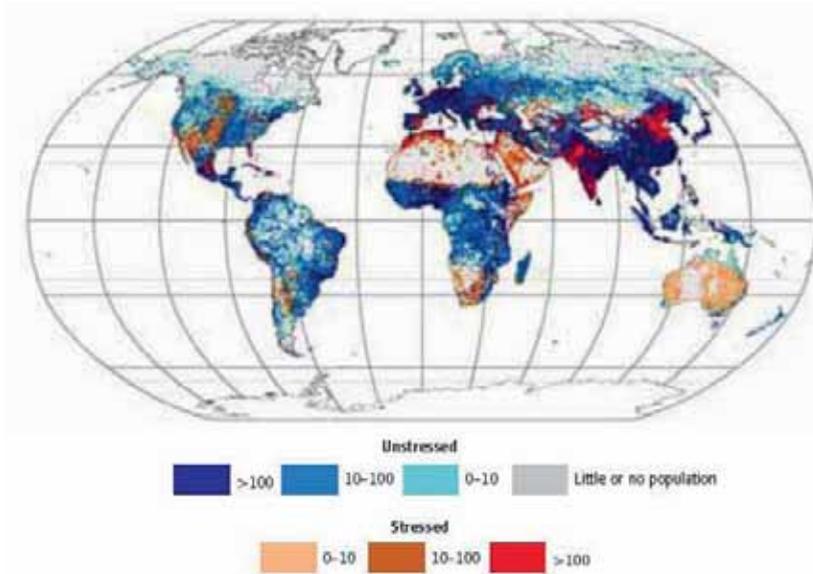


Abbildung 1: Bevölkerung (in tausend) mit (rot) und ohne (blau) Wasserstress. (Quelle: [UNESCO 2006])

2025: 50 % der afrikanischen Bevölkerung werden unter Wasserstress leiden

Die UN-Kommission für nachhaltige Entwicklung verwendet einen mehr verbrauchsorientierten Indikator für Wasserknappheit, den so genannten relativen Wasserstress-Index. Dieser berücksichtigt das Verhältnis von Wasserverbrauch zu vorhandenem, erneuerbarem Wasser. Berechnungen zufolge leiden aber auch gemäß diesem Indikator viele Regionen unter Wassermangel, z. B. sind derzeit vierzehn afrikanische Länder von Wasserstress betroffen, und bis 2025 werden es elf weitere sein. Dann leben fast 50 % der afrikanischen Bevölkerung in von Wasserstress betroffenen Ländern.¹ Abbildung 1 vermittelt einen Eindruck der weltweit an Wasserstress leidenden Erdteile.

Die Einstufung ganzer Länder als von Wasserknappheit betroffen ist methodisch unpräzise, da Wasserknappheit ein regional begrenztes Phänomen ist, das innerhalb eines Landes, wie z. B. Brasilien, variieren kann [Klaphake 2001]. Der relative Wasserstress-Indikator kann entsprechend angepasst werden. Bis zum Jahr 2025 werden Prognosen zufolge mehr als 1,8 Milliarden Menschen unter extremer Wasserknappheit zu leiden haben [UN Water 2007].

Ob globale Wasserressourcen knapp sind, ist strittig

Ob die globalen Wasserressourcen insgesamt als knapp zu bezeichnen sind, ist bis heute umstritten, es gibt Anhaltspunkte dafür, dass sie ähnlich wie Nahrungsmittel in ausreichender Form vorhanden sind.

¹ <http://www.unep.org/themes/Freshwater/Regions/index.asp?case=roa>

2 WASSERKNAPPHEIT - URSACHEN UND HERAUSFORDERUNGEN

2.1 Ursachen

Im Folgenden werden die häufigsten Ursachen für Wasserverknappungen beschrieben.

2.1.1 Natürliche Verteilung und Erneuerung von Wasserressourcen

Die Erdoberfläche ist zu fast zwei Drittel mit Wasser bedeckt, aber nur rund 3 % davon ist Süßwasser und somit für den Menschen genießbar; der Rest ist salzhaltig. Der größte Teil des Süßwassers lagert in gefrorenem Zustand an den Erdpolen und in Gletschern oder im Grundwasser²; weniger als 1 % ist in Flüssen, Seen und Sümpfen direkt zugänglich. Im hydrologischen Kreislauf zwischen Ozeanen, Atmosphäre und Boden werden die Wasserreserven ständig erneuert; die Erneuerungsraten differieren jedoch erheblich. Feuchtgebiete erneuern sich im Mittel alle 5 Jahre, Seen ca. alle 17 Jahre, und für die Grundwasserbestände wird eine mittlere Regenerationsrate von 1.400 Jahren angenommen [UNESCO 2000]. Der größte Teil der erneuerbaren Reserven fällt als Niederschlag über den Ozeanen und dünn besiedelten Gebieten oder fließt ungenutzt ins Meer zurück.

2/3 der Erdoberfläche besteht aus Wasser, nur 3% ist Süßwasser

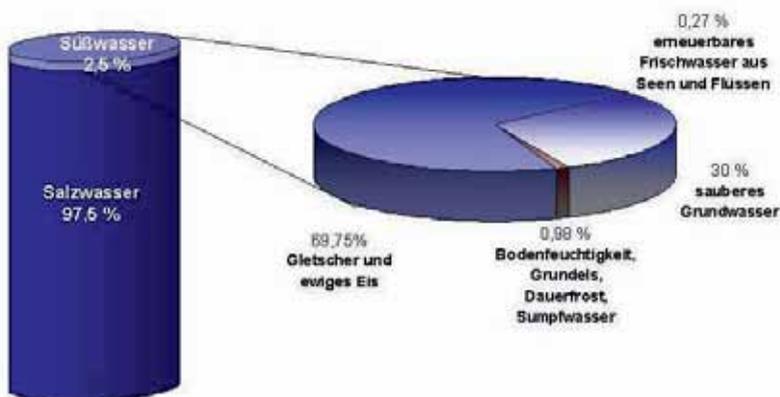


Abbildung 2: Wasserverteilung auf der Erde. (Quelle: VDI-ZTC-Darstellung nach [BMZ 2005])

² Unterirdisches Wasser, das die Hohlräume der Erde zusammenhängend ausfüllt.

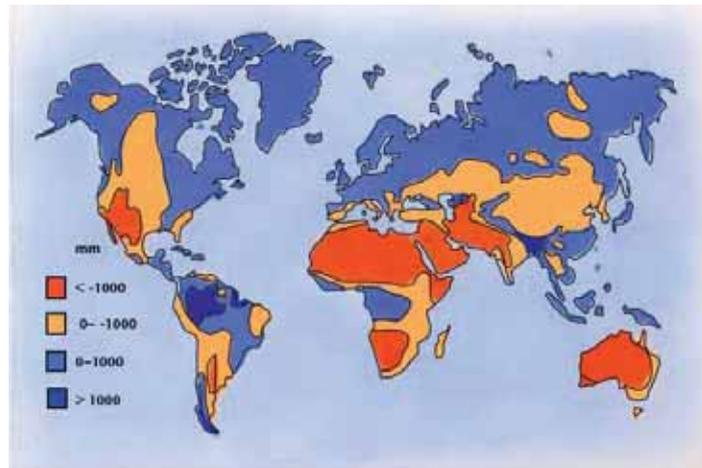


Abbildung 3: Unterschiede hydrologisch bedingter Wasserknappheit (rot, Evapotranspiration größer als Niederschlagsmenge) oder -überangebot (blau). (Quelle: [Falkenmark 2005])

Wasserreserven sind
geografisch und
saisonal
unterschiedlich
verteilt

Die Wasserreserven sind geografisch und saisonal sehr unterschiedlich verteilt. In ariden oder semi-ariden Gebieten³, wie vielen afrikanischen Ländern oder dem Nahen und Mittleren Osten ist Wasser naturgemäß von geringer Verfügbarkeit, natürliche Wasserknappheiten können auftreten. In den afrikanischen Ländern herrscht eine überdurchschnittlich hohe Wasserknappheit im Vergleich zu anderen Ländern. Einer der Gründe hierfür ist die vergleichsweise hohe Bevölkerungszahl für Trockengebiete: etwa 75 % der afrikanischen Bevölkerung lebt unter ariden oder semi-ariden Bedingungen [UNESCO 2006].

Wasserknappheiten können auch in Regionen auftreten, die ausreichende Wasserressourcen besitzen, nämlich dann, wenn die Qualität des vorhandenen Wassers durch Verschmutzung sehr gering ist und keine ausreichende Versorgung mit sauberem Wasser gewährleistet werden kann.

Deutschland:
reichliches
natürliches
Wasserdargebot

Deutschland und viele andere Länder warmgemäßiger Zonen verfügen über ein reichliches Wasserdargebot⁴. Abbildung 4 stellt die Verteilung der mittleren Niederschläge in Deutschland dar. Im westlichen Teil des Landes fallen im Mittel 650-1.500 mm Niederschlag, während im Osten

³ Arid bedeutet, dass ganzjährig die potenzielle Verdunstung größer ist als der Jahresniederschlag. Semi-arid bezeichnet Klimazonen in denen dieser Zustand nur zeitweise im Verlauf eines Jahres auftritt.

⁴ Nutzbares, für eine bestimmte Zeit ermitteltes Wasservolumen (Wasserzufluss) aus Grund- oder Oberflächenwasservorkommen (nach DIN 4046).

durchschnittlich nur etwa 450-650 mm fallen. Es wird rund 22 % [BMU 2006] des Wasserdargebots genutzt; der geringste Anteil entfällt auf die Trinkwasserversorgung und der größte Anteil auf die Kühlung von Wärmekraftwerken.

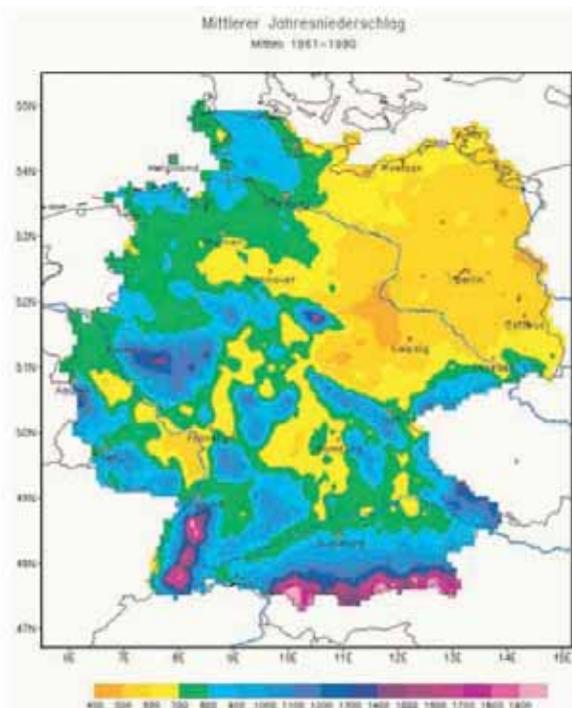


Abbildung 4: Verteilung der mittleren jährlichen Niederschläge [mm] im Zeitraum 1961-1990 in Deutschland. (Quelle: Bernhard Mühr, Institut für Klimaforschung und Meteorologie, Universität Karlsruhe)

2.1.2 Ressourcen(über)nutzung

Dem seit Jahrtausenden relativ konstanten Wasserdargebot steht ein stetig steigender Wasserbedarf einer wachsenden Weltbevölkerung gegenüber. Für das Jahr 2050 wird ein Anstieg der Weltbevölkerung von derzeit etwa 6,6 Milliarden Menschen auf über 9 Milliarden vorhergesagt.⁵ Die steigenden Bevölkerungszahlen, insbesondere in den Entwicklungsländern, gehen mit einer Zunahme an Haushalten, Industrie und Landwirtschaft einher.

⁵ James Vaupel in MaxPlanckForschung 4/2007 sowie <http://www.weltbevoelkerung.de/>

Hauptnutzer von Wasser ist die Landwirtschaft

Hauptnutzer von Wasser ist im Mittel mit knapp 70 % die ressourcenintensive Landwirtschaft, die der Bereitstellung von Nahrungsmitteln, Rohstoffen und Energie dient. Industrie und private Haushalte sind mit ca. 20 % bzw. 10 % geringere Wasserverbraucher. Hierbei ist zu beachten, dass der Wasserverbrauch in der Landwirtschaft und der Industrie stark von der Wirtschaftsstruktur und damit auch vom Entwicklungsgrad des jeweiligen Landes abhängt (vgl. Abbildung 5). In Deutschland sind Wärmekraftwerke mit über 65 % Hauptverbraucher von Wasser. Sie beziehen das Kühlwasser fast immer direkt aus Flüssen oder Seen und leiten es erwärmt wieder ab; Grundwasser ist hierfür nicht notwendig.

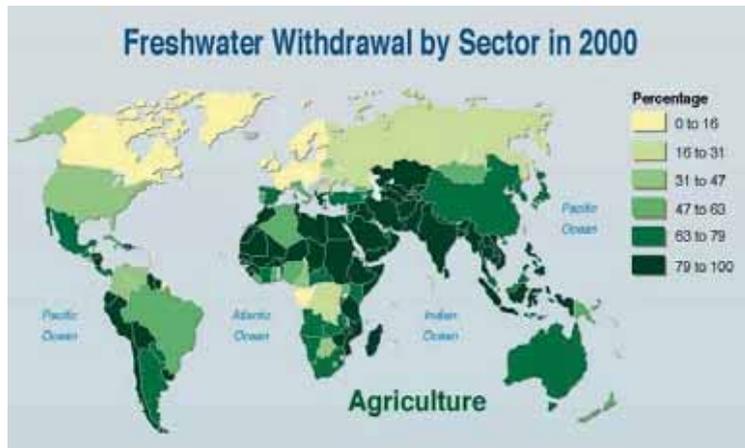


Abbildung 5: Anteil der Landwirtschaft an der Wasserentnahme des jeweiligen Landes. (Quelle: [WRI 2000])

Steigender Wasserbedarf in den kommenden Jahrzehnten

Für die kommenden Jahrzehnte wird ein insgesamt steigender Wasserbedarf vorhergesagt. In der Landwirtschaft wird das größte Wachstum erwartet, da bei zu erwartenden Produktionssteigerungen die nutzbare landwirtschaftliche Fläche weiter abnehmen wird. Auch für den anhaltend starken Anbau von Energiepflanzen wird zunehmend mehr Wasser benötigt.

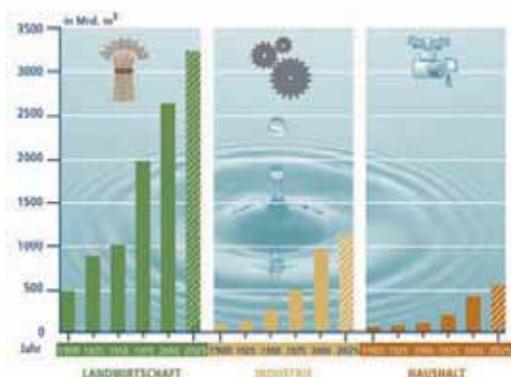


Abbildung 6: Weltweiter Wasserverbrauch in der Landwirtschaft, der Industrie und den Privathaushalten für die Jahre 1990 bis 2025. (Quelle: [BMZ 2005])

Für einen Liter Biodiesel werden bis zu 3500 l Wasser verbraucht. Abbildung 6 stellt den Wasserverbrauch und dessen mögliche Entwicklung in den Bereichen Landwirtschaft, Industrie und Haushalt von 1990 bis ins Jahr 2025 dar.

Der durchschnittliche weltweite **Pro-Kopf-Verbrauch** von Trinkwasser liegt bei rund 50 Litern am Tag. Dies entspricht der von der Europäischen Union als unterste Grenze formulierten Menge an sauberem Wasser, die jeder Person am Tag zur Verfügung stehen sollte. Die länderspezifischen Unterschiede sind jedoch sehr groß. Deutschland hat einen durchschnittlichen Pro-Kopf-Verbrauch von ca. 127 Litern pro Tag mit seit Jahren leicht fallender Tendenz, in den USA werden fast 300 Liter am Tag verbraucht, und einem Afrikaner stehen im Mittel nur 6 Liter pro Tag zur Verfügung [Jaffe 2004]. In Deutschland werden über die Hälfte des Trinkwassers im Haushalt für die Toilettenspülung und die Körperpflege (Duschen, Baden) verwendet (siehe Abbildung 7).

Pro-Kopf-Verbrauch sehr unterschiedlich. Deutschland ca. 127 l/Tag; USA ca. 300 l/Tag

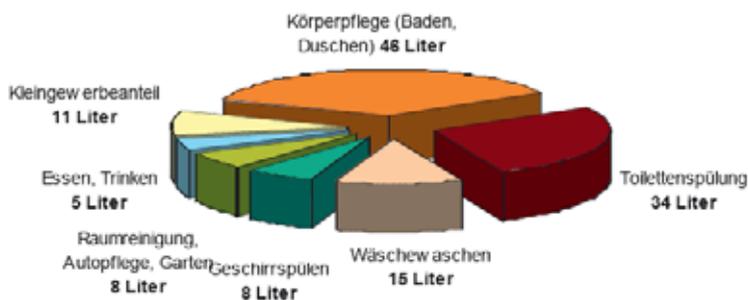


Abbildung 7: Wassernutzung im deutschen Haushalt (2001). (Quelle: Bundesverband der Energie- und Wasserversorgung e. V.)

Zentrale
Süßwasserquelle:
Grundwasser

Die zentrale Süßwasserquelle für den Menschen ist das **Grundwasser**. Verfügbarkeit und Qualität des Grundwassers sind dabei trotz des ubiquitären Charakters lokal unterschiedlich. Die besondere Bedeutung des Grundwassers liegt darin begründet, dass es von hoher Qualität ist, da die darüber liegenden Erdschichten der Reinigung dienen und einen Schutz vor Verunreinigungen bieten. In Europa stammen zwei Drittel des Trinkwassers aus Grundwasser, in Deutschland sind es 74 % und in Indien 80 %. Besonders Mega-Cities decken ihren Bedarf fast ausschließlich über Grundwasservorräte: Mexiko Stadt bezieht 70 % seines Wasserbedarfs aus Grundwasser. Die weltweiten Grundwasserentnahmen haben sich seit 1950 mehr als verdreifacht.

Übermäßige Entnahme
von Grundwasser hat
negative
Auswirkungen

Folge der quantitativen Entnahme kann eine Absenkung des Grundwasserspiegels um mehrere Meter pro Jahr sein [Grobosch 2003]. In Peking ist der Grundwasserspiegel seit der Jahrtausendwende um 3,7 Meter gesunken; 2003 musste die Stadt mit 24 Metern doppelt so tief nach Wasser graben wie fünf Jahre zuvor.⁶ In Mexiko Stadt wurde in den 1980er Jahren, nachdem die Stadt von 1,6 auf 12,9 Milliarden Menschen angewachsen war, so viel Grundwasser entnommen, dass sich das Erdreich jährlich um ca. 30 Zentimeter senkte [Wallacher 1996]. Das Absenken des Grundwasserspiegels in küstennahen Regionen führt zum Eindringen salzhaltigen Wassers in die Trinkwasseraquifere⁷. In Israel und zunehmend auch im Gaza-Streifen sind die Brunnen für die Trinkwasserversorgung und zur Bewässerung der Felder unbrauchbar geworden⁸; die Staaten entlang der Mittelmeerküste haben wegen starker Übernutzung der Grundwasservorräte mit dem Eindringen von Salzwasser zu kämpfen.⁹

Fossiles Grundwasser
gilt als nicht
regenerierbar

Fossile Grundwasservorräte stellen eine weitere Süßwasserquelle dar. Das oftmals viele tausende, teils sogar hunderttausende¹⁰ Jahre alte Wasser ist in tiefen Bodenschichten verborgen und regeneriert sich entsprechend den Entstehungszeiträumen extrem langsam bis gar nicht. Diese Ressource muss daher als endlich betrachtet werden und gilt bei heutigen Förderquoten in 50 bis 100 Jahren als erschöpft [Lassarre 2005].

Wird mehr Wasser, Grundwasser oder Oberflächenwasser entnommen, als regeneriert werden kann, kommt es zu einer **Übernutzung** der Ressource. Abbildung 8 verdeutlicht, in welchen Erdteilen der Wasserverbrauch das natürliche, erneuerbare Wasserdargebot übersteigt. Zu den Folgen dieser Übernutzung gehören Bodenerosion, Absenkung

⁶ „Chinas Wasserwirtschaft bietet gute Chancen für deutsches Know-How“ in VDI Nachrichten vom 28.7.2006

⁷ Gesteinskörper mit Höhlräumen, der zur Leitung von Grundwasser geeignet ist.

⁸ http://www.menschen-recht-wasser.de/downloads/2_5_2_wasser-nahost.pdf

⁹ Rettung für den Mittelmeerraum? BR online vom 02.04.2008

¹⁰ http://www.vistaverde.de/news/Wissenschaft/0403/01_sahara.php

des Erdreichs, Verlandung, Versalzung sowie lange Wassertransportwege und, langfristig betrachtet, Wasserknappheit.

Ein prominentes Beispiel für eine drastische Übernutzung einer Süßwasserquelle ist das teils in einer semi-ariden Region gelegene Ogallala-Aquifer in den High Plains (USA). Es handelt sich hierbei um ein großes Trinkwasseraquifer, das in einer landwirtschaftlich sehr intensiv genutzten Region liegt. Seit über hundert Jahren wird das Wasser des Aquifers zur Bewässerung der Felder verwendet. Dabei liegt das Verhältnis von entnommenem und wieder zugeführtem Wasser bei etwa 25:1. Diese starke Übernutzung der Wasservorräte könnte in den kommenden Jahrzehnten dazu führen, dass weite Teile der bewässerten Flächen zu Brachland werden [Guru 2000].

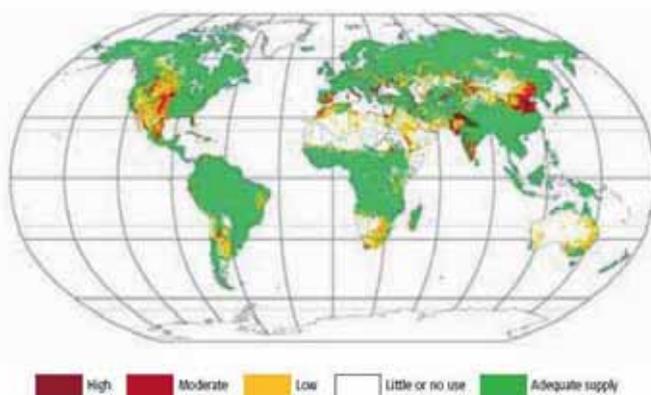


Abbildung 8: Wasserverbrauch im Verhältnis zum natürlichen, lokalen Dargebot. Rot gibt einen deutlich größeren Wasserverbrauch wieder als lokal verfügbar, grün steht für einen adäquaten Verbrauch. (Quelle: [UNESCO 2006])

2.1.3 Wasserverschmutzung

Das Grundwasser und die Oberflächengewässer werden zunehmend durch menschliches Handeln verschmutzt. Rund 95 % der weltweiten Abwässer aus privaten Haushalten, industriellen Anlagen und der Landwirtschaft werden ungeklärt abgeleitet; etwa 40 % der Weltbevölkerung verfügen über keine oder keine adäquate Abwasserentsorgung. Nicht einmal 10 % der Bevölkerung ist an eine Kläranlage angeschlossen, das gilt nicht nur für Entwicklungsländer, auch die belgische Hauptstadt Brüssel hatte lange Zeit keine bzw. nur eine völlig unterdimensionierte Kläranlage [Wilderer 2005]. Erst im Jahr 2007 wurde eine Großkläranlage im Norden der Stadt, die auf die Bedürfnisse der Millionenstadt ausgelegt ist, als einsatzbereit vermeldet.¹¹ Trotz der EU-Richtlinie zur Einleitung kommunaler

Etwa 95 % der weltweiten Abwässer werden nicht geklärt

¹¹ <http://www.aquiris.be/index.html?current=1&page=1&page2=1&lang=en>

Abwässer, die eine Behandlung des Abwassers für Stadtgebiete mit mehr als 10.000 Einwohnern zwingend vorschreibt, erfüllten zumindest im Jahr 2003 über 70 europäische Großstädte diese Kriterien nicht. Darunter z. B. Dover, Mailand, Dublin oder auch Paris, sowie eine Vielzahl von kleineren Ortschaften. Bis Ende 1960 leiteten die meisten Haushalte und Industrieunternehmen auch in Deutschland ungereinigte Abwässer in die Flüsse ein, mittlerweile werden jedoch 95 % der kommunalen Abwässer geklärt.

Wasserknappheiten
können durch starke
Verschmutzung der
Süßwasserquellen
entstehen

Mitunter kann die Belastung der Gewässer so groß werden, dass Wasserknappheit auftritt, wie z. B. in der Stadt Shanghai. Eigentlich ist durch den Yangtze-Fluss und den Taihu See ausreichend Wasser für die über 18 Millionen Bewohner des Verwaltungsbezirks Shanghai vorhanden. Doch Einleitung von einer Milliarde Tonnen ungeklärter industrieller Abwässer und 800.000 Tonnen Abwässer aus Haushalten belasten den See und führen dazu, dass das Wasser nicht trinkbar ist.¹²

Quellen von
Verschmutzungen
vielfältig

Die möglichen **Quellen für eine Gewässerverschmutzung** sind sehr vielfältig: von punktueller Einbringung wegen schadhafter Installationen bis zu diffusem Eintrag. Abbildung 9 illustriert einige Ursachen. Schadstoffe werden auch durch Niederschläge von den Straßenoberflächen in die Oberflächengewässer gespült.

Industrien tragen
zu starken
Verschmutzungen bei

Prominente Beispiele für extreme Wasserverschmutzer sind Industrien, die Rohstoffe aus dem Boden gewinnen und verarbeiten, wie der Bauxit-Abbau zur Aluminium-Herstellung, der verseuchten Boden zurücklässt, oder die Erdölgewinnung im Regenwald Ecuadors, die in den letzten 20 Jahren dafür verantwortlich war, dass eine halbe Millionen Barrel Öl in Ecuadors Flussläufe gelangen konnte [Sachs 2005]. Auch Chemieunfälle tragen zu starken Wasserverschmutzungen und daraus folgenden Wasserknappheiten bei. Durch eine Explosion in einem Chemiewerk in der chinesischen Provinz Jilin sind hunderte Liter von giftigem Benzol ausgetreten und haben den nahe gelegenen Fluss Songhua verseucht. Dieser ist das Trinkwasserreservoir der Millionenstadt Harbin; die komplette Trinkwasserversorgung der Stadt musste fünf Tage lang abgestellt werden, bis der Benzolteppich vorbeigezogen war.¹³ Stromabwärts liegende Städte sahen sich mit dem gleichen Problem konfrontiert.

¹² <http://www.stabi.hs-bremerhaven.de/dss/Wasser.html>

¹³ „Millionenstadt ohne Wasser“ in VDI Nachrichten vom 02.12.2005

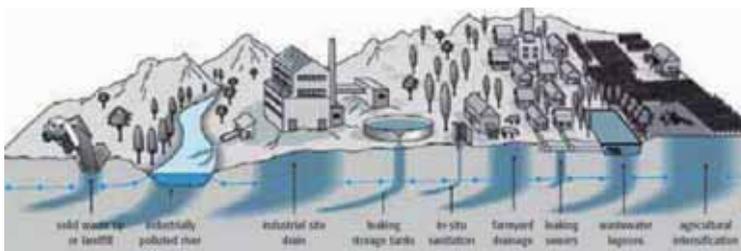


Abbildung 9: Mögliche menschliche Quellen für eine Grundwasserverschmutzung.
(Quelle: [UNESCO 2006])

Etwa 25 % der nordamerikanischen ländlichen Bevölkerung ist nicht an ein zentrales Abwassernetz angeschlossen, sondern auf die Verwendung von septischen Systemen unter dem Haus oder Grundstück angewiesen. Das Abwasser wird in einen Tank geleitet, Feststoffe abgetrennt und von Bakterien verdaut, das relative klare Wasser wird über ein Drainage-System in den Untergrund versickert. Viele Schadstoffe werden mit dieser Methode vor der Einleitung nicht eliminiert. In Regionen hoher Einwohnerdichte kann es daher zu Grundwasserbelastungen kommen, die über den geltenden Grenzwerten liegen.

In Deutschland sind die Schädigung der Gewässerstruktur (Schifffahrt, Begradigung, Vertiefung und Krautschnitt von Bächen) sowie diffuse Schadstoffeinträge von landwirtschaftlicher Düngung von größter Bedeutung; Einleitungen aus kommunalen und industriellen Kläranlagen von geringerer.

Schädigung der Gewässerstruktur und diffuse Einträge in Deutschland von Relevanz

Die häufigsten Gewässer belastenden Schadstoffe sind Pathogene und Mikroben, Nährstoffe aus Düngemitteln, Versalzung, Versäuerung, Schwermetalle, toxische organische Substanzen (PCB, Pestizide), thermische Schädigungen und suspendierte Festkörper [UNESCO 2006]. Auch Öle und Radionuklide sind von Bedeutung, ebenso wie luftgetragene Schadstoffeinträge, die durch den Regen ausgewaschen werden. In den USA bereiten besonders Blei aus korrodierten Leitungen, Arsen und Perchlorate aus Raketentreibstoff zunehmend Probleme. In Entwicklungsländern sind dagegen Belastungen mit Bakterien und pathogenen Organismen, organischen Substanzen und Arsen von vorrangiger Bedeutung.

Einige Schadstoffe: organische Substanzen, Pathogene, Düngemittel

Eintrag von Nährstoffen und Pestiziden

Der Eintrag von Stickstoff und Phosphor in die Gewässer erfolgt in großen Mengen und führt zu extremer Belastung. Durch das überhöhte Nährstoffangebot (Eutrophierung) wird ein Massenwachstum von Algen ausgelöst, die zwar einerseits große Mengen an Sauerstoff produzieren, aber andererseits eine noch größere Menge Sauerstoff für die Zersetzung

Stickstoff und Phosphor aus Düngemittel führen zu Eutrophierung von Meeren und Seen

benötigen. Fäulnisprozesse, Fischsterben und Verlust der Biodiversität sind einige Folgen. Durch Eutrophierung können die Ökosysteme ganzer Meere nachhaltig verändert werden. Das schwarze Meer gilt als eutrophisches System. 650.000 Tonnen Stickstoff und mehr als 50.000 Tonnen Phosphor sowie 2,5 Milliarden Kubikmeter meist ungeklärte Abwässer finden ihren Weg ins schwarze Meer. Auch der Zustand der Ostsee gilt trotz zahlreicher nationaler und internationaler Bemühungen immer noch als alarmierend [Frid 2003].

Phosphatmissionen
aus der
Landwirtschaft
steigend

Die Einträge von Phosphor in deutsche Gewässer sind seit Jahren rückläufig, Gründe hierfür sind das 1987 in Kraft getretene und 2007 überarbeitete Wasch- und Reinigungsmittelgesetz, das zu phosphatfreien Waschmitteln sowie einer verbesserten Reinigung in den kommunalen Kläranlagen (Phosphatfällung) geführt hat. Das Problem der diffusen Nährstoffeinbringung über die landwirtschaftliche Düngung besteht jedoch weiterhin. Heute gelten 60 % der Böden als ausreichend oder übermäßig mit Phosphaten versorgt [Rudolph 2001]. Aufgrund dieses Überschusses steigen die Phosphatmissionen aus landwirtschaftlich genutzten Flächen.

Nitratbelastung
insgesamt zu hoch

Die Nitrateinträge in Deutschland haben sich seit 1995 im Mittel nicht weiter erhöht, sie sind konstant geblieben. Dennoch zeigen etwa 14 % der Nitratmessstellen des 800 Messstationen umfassenden Netzes (EUA-Messnetz) so hohe Nitratbelastungen, dass das Wasser nicht ohne Behandlung als Trinkwasser genutzt werden kann. Weitere 36 % der Messstellen zeigen eine deutliche bis starke Nitratbelastung, wobei die Messwerte jedoch innerhalb der Grenzwerte der Trinkwasserverordnung liegen. Die restlichen 50 % der Messstellen zeigen keine oder nur geringfügige Belastung mit Nitrat [BMU 2006b]. Im europäischen Kontext sind die Nitratwerte insgesamt leicht rückläufig – in einzelnen Ländern, wie z. B. in Spanien, steigen die Nitratkonzentrationen jedoch deutlich an [WWF 2006].

Grundwasser
weiterhin mit
Pestiziden und
Herbiziden belastet

Neben den Nährstoffen geben besonders Pestizidfunde im Grundwasser Anlass zur Sorge. Der aktuelle Bericht über die Belastung des Grundwassers belegt, dass sich die Grundwasserbelastung nur unwesentlich verringert hat, für einige Substanzen ist sogar eine leichte Zunahme festzustellen [BMU 2006b]. Auch Herbizide, wie das seit 1991 verbotene Atrazin (Einsatz als Unkrautvernichter im Mais-, Spargel-, Kartoffel- und Tomatenanbau), finden sich in den Gewässern in überhöhten Konzentrationen. Viele organische Spurstoffe sind xenobiotisch¹⁴ und anthropogenen Ursprungs. Zu ihnen gehören die halogenierten Kohlenwasserstoffe, polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe, Tenside, Phenole und Aniline [Schreiber 2005].

¹⁴ Synthetisch hergestellte Stoffe, die in der Natur nicht vorkommen (z. B. Pestizide).

Arzneimittelrückstände und endokrin wirksame Substanzen

Besonders persistente¹⁵ organische Verbindungen, wie z. B. Arzneimittel und deren Metabolite, Steroide und Desinfektionsmittel finden sich angereichert in den Gewässern. Einzelne Substanzen können über Jahrzehnte weitgehend unverändert im Ökosystem verbleiben, wie anhand von Babituraten gezeigt wurde. Die Forscher konnten nachweisen, dass eine große Anzahl an Vertretern dieser Stoffklasse im Grundwasser 40 Jahre alt ist.¹⁶

Arzneimittel und Metabolite noch nach 40 Jahren im Grundwasser nachweisbar

Steroidhormone und auch Pestizide können Einfluss auf das menschliche Hormonsystem nehmen und endokrin wirken. Einige Substanzen werden darüber hinaus verdächtig, karzinogen und mutagen zu wirken. Eine Studie der staatlichen geologischen Überwachungsbehörde in den USA hat das Vorkommen von 96 Reststoffen aus 15 Stoffgruppen in geringen Konzentrationen in den landesweiten Gewässern untersucht [Erickson 2002]. Steroide, Tenside und deren Metabolite sowie Weichmacher machen zusammen 70 % der nachgewiesenen Schadstoffe aus (vgl. Abbildung 10). Einen ebenfalls deutlichen Anteil nehmen nicht verschreibungspflichtige Pharmaka ein, darunter insbesondere Paracetamol. Für Deutschland könnte sich ein ähnliches Bild ergeben. Die kommunalen Kläranlagen sind in der Regel nicht auf die Beseitigung von in Spuren vorkommenden organischen Verbindungen ausgelegt.

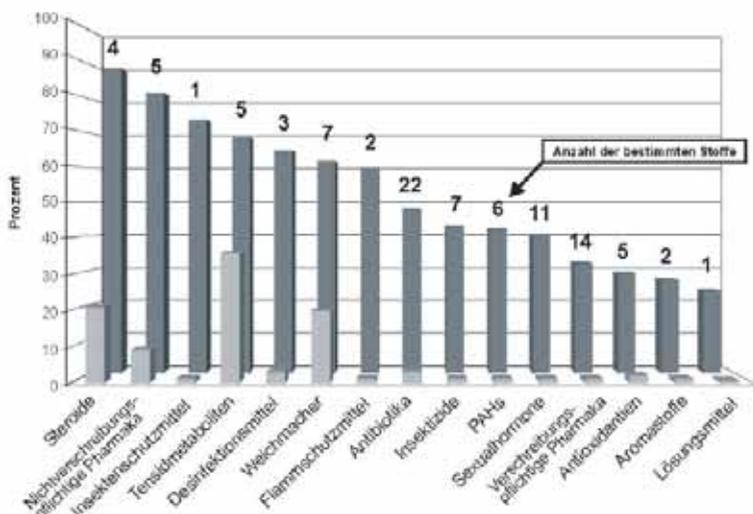


Abbildung 10: Nachgewiesene organische Reststoffe in Gewässern der USA. Hinterer Balken: Anzahl der Stoffe, vorderer Balken: Anteil an der Schadstoffmenge. (Quelle: [Schröder 2003])

¹⁵ In der Kläranlage und im Ökosystem schwer abbaubar.

¹⁶ <http://idw-online.de/pages/de/news171485>

2.1.4 Großbauprojekte, anthropogene Eingriffe und Wassertransport

Weltweit mehr als
50.000 Staudämme
und über 1.700 im Bau

Für die agroindustrielle Nutzung galt die Erschließung und Modifikation von Flussbecken lange als notwendige Maßnahme. Große Ströme wurden umgeleitet, begräbt und/oder aufgestaut. Heute werden mehr als 50.000 Staudämme weltweit zur Sicherung der Trinkwasserversorgung und zur Energiegewinnung betrieben, und mehr als 1.700 befinden sich im Bau [Baur 2001].

Besonders in ariden und semi-ariden Vegetationen, wie der Sahel-Zone (z. B. Manantali- und Diama-Staudamm), aber auch in regenarmen Regionen gemäßiger Breitengrade (z. B. Trinkwassertalsperre Leibis-Lichte im Thüringer Wald¹⁷) werden große Hoffnungen auf eine sichere Trinkwasserversorgung mit dem Bau eines Staudamms verbunden. Hierbei ist zu beachten, dass sich diese Hoffnung in den seltensten Fällen bewahrheitet; oft werden die berechneten Kapazitäten nicht erreicht und die Probleme nicht gelöst. Spanien gehört zu den Ländern, das viele Staudämme errichtet hat und die Errichtung weiterer plant. Die realisierten Bauten konnten die Wasserprobleme des Landes nicht lösen, lokal ist es sogar zu einer Verschlechterung der Lage gekommen [WWF 2006].

Staudammprojekte
sind von negativen
Auswirkungen
begleitet

Der Bau eines Staudamms ist von sozialen Verwerfungen begleitet, wie z. B. Umsiedlungsmaßnahmen. Im Falle des 2006 fertig gestellten Dreischluchten-Staudamms in China waren über eine Millionen Menschen von solchen Maßnahmen betroffen [Baur 2001]. Schwerwiegende Folgen hat die Errichtung eines Staudamms auch auf das marine Leben und das Ökosystem der Flussregion. Nur noch wenig Wasser erreicht die Flussmündung, wie z. B. beim Bau des Assuan-Staudamms (die Wassermenge, die das Nildelta erreicht sank von 38 % auf 2 %) oder am Colorado River (der Fluss führt im Delta nur noch bei extremem Hochwasser etwas Wasser) [Wallacher 1996]. Es drohen Verlandung, gestörte Sedimentation, Verlust von Biodiversität und eine dauerhafte Veränderung von Wasserkreisläufen. Die klimatischen Verhältnisse werden verändert, denn das aus Stauseen verdampfende Wasser beeinflusst lokale Niederschlagsmuster.

Flussumleitungen
haben drastische
Konsequenzen.
Beispiel Aralsee

Weitere anthropogene Eingriffe, wie Flussumleitungen, haben ebenso drastische Auswirkungen. Das prominenteste Beispiel für Konsequenzen aus Flussumleitungen in Verbindung mit weiteren ökonomischen, klimatischen, hydrologischen und tektonischen Ursachen ist der Aralsee. Die beiden Hauptzuflüsse Amy Darya und Syr Darya wurden zur Bewässerung der umliegenden Wüstengebiete umgeleitet, und das Binnengewässer Aralsee hat in der Folge 90 % seines Volumens und den

¹⁷ Einweihung des Damms: 20.5.2006, Flutung andauernd bis 2008; „Mehr Trinkwasser für Thüringen“ in VDI Nachrichten Nr. 23 vom 9.6.2006

Großteil seiner Flora und Fauna verloren; es ist von der Verlandung bedroht [Giese 2002]. Der umgeleitete Fluss Amy Darya verlor wegen schlechter Wartung der Kanalsysteme 50 % des eingespeisten Wassers [Lasserre 2005], ebenso der Fluss Syr Darya. Anlass zur Hoffnung geben jedoch erste Bemühungen, den Wasserpegel des Sees anzuheben. Ein neuer Damm, der 1999 von der Welt-Bank als Notfallmaßnahme in Auftrag gegeben wurde, half dabei ebenso, wie Reparaturen an den maroden Systemen rund um den Syr Darya in Kirgisistan. Eine Verdopplung der Wasserkapazität des Flusses und damit ein stärkerer Wasserzufluss in den Aralsee waren die Folge. In nur sieben Monaten stieg der Pegel um drei Meter. Neue Planungen, den Wasserpegel durch einen höheren Damm um weitere vier bis sechs Meter anzuheben, sind in Vorbereitung [Pala 2006]. Auch andere Binnengewässer und -meere, deren Zuflüsse umgeleitet wurden, sind von einer Austrocknung und Verlandung bedroht, wie z. B. der Tschad-See [Hinrichsen 2003] oder das Schwarze Meer.

Neben Flussumleitungen und Staudämmen ist der Ausbau vieler Flüsse für die Schifffahrt schädigend für die Gewässerstruktur. Die Durchbrechung von Flussschlingen sowie Flussbegradigung, die Vertiefung des Flussbettes und die Verbauung der Ufer sind problematisch. Nicht zu unterschätzende Eingriffe sind die Ableitungen von erwärmtem Wasser aus Wärmekraftwerken, die Flusswasser zu Kühlzwecken verwenden. Das aquatische Leben ist temperatursensitiv und wird durch die Erwärmung des Flusses nachhaltig verändert.

Ein Sonderfall anthropogener Eingriffe stellen Kriege dar, die Wassertransportwege nachhaltig zerstören. Ein Beispiel sind die Karez¹⁸ in Afghanistan. In den 1980er Jahren wurden sie von den Mujahedin als Verstecke genutzt und später von den USA auf der Suche nach Taliban-Kriegern mit cave-busting bombs zerstört. Die Wasserversorgung ist seit den kriegerischen Auseinandersetzungen deutlich schlechter geworden und geht einher mit Nahrungsunsicherheit wegen fehlender Bewässerung.¹⁹

Kriege wirken sich negativ auf die Wasserversorgung aus

Zum **Transport von Wasser** vom Ort der Gewinnung bis zum Nutzer werden lange Wege in Kauf genommen. Gewaltige Kanalsysteme, wie z. B. der israelische National Water Carrier, der inzwischen fast ganz Israel wie ein Netz überzieht (Entnahmestelle See Genezareth), oder der King-Abdullah-Kanal in Jordanien (Wasser aus dem Fluss Yarmuk) transportieren Wasser zu Aufbereitungsanlagen. Dabei kann es zu erheblichen Verlusten durch Verdunstung oder Versickerung kommen.

Transport von Wasser in offenen Kanälen ist verlustreich

¹⁸ Von Hand gegrabene Bewässerungssysteme, meist unterirdisch.

¹⁹ „Der Fluch des Wassers“, Spiegel online vom 22.2.2006 und „Wasser für Afghanistan“, 3sat, 30.4.2007

Die Landwirtschaft bedient sich meist offener Kanäle zum Wassertransport zu den Feldern; nicht selten werden die Felder vollständig geflutet. Bis zu 70 % des Wassers kann dann ungenutzt im Boden versickern.

Unterirdische
Kanalsysteme oftmals
marode - hohe
Verluste durch
Leckagen

In Großstädten wird Trinkwasser oft unterirdisch in Rohrleitungssystemen vom Wasserwerk zum Kunden transportiert. Wasserverluste durch ineffiziente, überalterte oder marode Wasserleitungssysteme sind extrem hoch. In London betragen die Verluste wegen Leckagen in den Rohrleitungssystemen über 30 % [Kürschner-Pelkmann 2006], in Peking sind es ca. 40 %²⁰, in Delhi Schätzungen zufolge gar 50 % [Nahrein 2006], in Hamburg hingegen nur wenige Prozent.

In ärmeren Ländern dienen Tankwagen dem Wassertransport (Trink- und Abwasser), in manchen Regionen wird Wasser vom Nutzer selber mittels Kanistern transportiert. Illegal gebohrte Brunnen oder unerlaubtes Abzweigen von Wasser ist vielerorts ein Problem.

2.1.5 Klimaänderungen

Es gilt mittlerweile als gesichert, dass ein globaler Temperaturanstieg nicht mehr zu verhindern und dass der Mensch sehr wahrscheinlich als Hauptverursacher zu betrachten ist. Szenarien, die das zukünftige Klima beschreiben, sind jedoch uneinheitlich. Einige globale Klimamodelle berechnen einen Temperaturanstieg von bis zu 5,5°C [IPCC 2007], andere Modelle prognostizieren einen Anstieg von 1,5-4,5°C bei einer Verdoppelung der CO₂-Emissionen [Anan 2006]. Die Modellierung von lokalen Niederschlägen und Niederschlagsmustern ist stark vom Modell und den zugrunde gelegten Parametern abhängig, so dass unterschiedliche Modelle zu teils verschiedenen Aussagen gelangen [Hoff 2006] und eine exakte Vorhersage von Niederschlägen schwierig ist.

Beispiele der vorhergesagten Folgen der Klimaveränderung beinhalten den Anstieg der Meeresspiegel, das Abschmelzen von Gletschern und Eisschilden, häufige Starkregen in gemäßigten Zonen, zunehmende Sommer-Trockenheiten in südeuropäischen Regionen [IPCC 2007], eine Verdopplung der Anzahl sehr starker Hurrikans in der Karibik und dem Pazifik [Kehse 2005] sowie Dürren, Überschwemmungen und Wasserknappheiten.

Die globale Temperaturerhöhung hat bereits zu einer Verringerung der Inlandsgletscherfläche geführt. Die Geschwindigkeit der Eisschmelze steigt, in den kommenden Jahrzehnten könnten die ersten Gletscher verschwunden sein. Seit Ende des 19. Jahrhunderts ist insgesamt ein Rückgang um 50 % zu verzeichnen [Münchner Rück 2006]. Die

Globaler
Temperaturanstieg
von bis 5,5 °C
prognostiziert

Modellierung lokaler
Muster schwierig

Verringerung der
Gletscherflächen seit
dem 19. Jahrhundert

²⁰ VDI Nachrichten, Nr. 30, 29.07.2005

Gletscher am Killimandscharo sind um 80 % zurückgegangen (1912-2000)²¹, die Ausdehnung der arktischen Meereisdecke hat etwa um 15 % abgenommen (seit 1950), ihre Dicke ist in dieser Zeit um 40 % geschrumpft [Occc 2002]. Der im Frühjahr 2007 vorgestellte vierte Report des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) stellt in Aussicht, dass die Arktis in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts eisfrei und bis zu 90 % der Permafrostböden aufgetaut sein könnten. illustriert den Rückgang eines Gletschers anhand einer Fotoserie.



Abbildung 11: South Cascade Glacier in den Washington Cascade Mountains, in den Jahren 1928, 1979 und 2000. (Quelle: National Snow and Ice Data Center)

Das schnelle Abschmelzen eines Gletschers führt zu kurzfristig höherem lokalem Wasserdargebot, das auch Überschwemmungen hervorrufen kann, dann jedoch rasch wieder abnimmt. Flüsse, die im Sommer ihren höchsten Stand hatten und vielleicht zur Trinkwasserversorgung herangezogen wurden, werden dann kleine Rinnsale sein, und eine Wasserverknappung kann die Folge sein.

Mittelmeerstaaten sind schon heute von Trockenheiten bedroht, insbesondere die südlichen Regionen Spaniens, Portugals und Italiens. Im Sommer 2005 fiel nach einer anhaltenden Hitzewelle so wenig Regen, wie seit 1947 (Spanien), bzw. 1931 (Portugal) nicht mehr. Die Pegelstände italienischer Flüsse in Florenz, Siena und Genua sind nach einer anhaltenden Hitzeperiode im Juli 2006 sehr niedrig;²³ auch Spaniens Wasserreserven erreichen Tiefstände in diesem Sommer.²⁴ Auch für das Jahr 2008 sind die Prognosen negativ, denn in der Zeit, in der die Talsperren ihren Höchststand erreichen sollen, sind sie nur zu etwa 40 % gefüllt.²⁵ Neben klimatischen Gründen sind insbesondere die Entnahme großer Mengen an Grundwasser, niedrige Wasserpreise, eine starke Zunahme des Tourismus und zahlreiche andere Faktoren Ausschlag gebend. Auch andere Regionen, wie z. B. die Amazonas-Region, werden wegen veränderter klimatischer Bedingungen von großen Trockenheiten belastet [Schiermeier 2006].

Es drohen heute schon Trockenheiten und Dürren in den Mittelmeerstaaten

²¹ <http://science.orf.at/science/news/60305>

²³ <http://www.netzeitung.de/reise/426500.html>

²⁴ <http://www.netzeitung.de/default/416120.html>

²⁵ Wassermangel schon lange vor der Saison, Kölner Stadt Anzeiger vom 15.2.2008

Auch ökonomische und institutionelle Faktoren für Wasserknappheiten entscheidend

2.1.6 Weitere Ursachen für Wasserknappheiten

Gründe für Wasserverknappungen sind nicht nur mit den physikalisch-geografischen Gegebenheiten oder den klimatischen Bedingungen zu erklären, sondern vor allem auch mit ökonomischen und institutionellen Faktoren [Rijsberman 2006]. In vielen finanzschwachen Regionen Asiens oder der Sub-Sahara wären die primären Wasservorräte ausreichend, doch die Infrastrukturen für eine entsprechende Nutzung und Reinigung fehlen. Abbildung 12 zeigt eine Projektion der weltweiten Wasserknappheiten im Jahr 2025, unterteilt in physikalische und ökonomische Wasserknappheit.

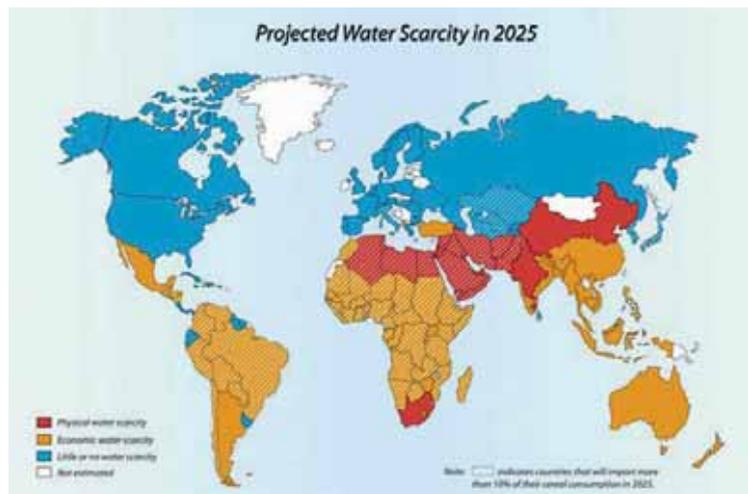


Abbildung 12: Mögliche Wasserknappheiten im Jahr 2025; unterteilt nach Ursachen: ökonomisch bedingt (gelb), physikalisch bedingt (rot) und keine oder nur geringe Wasserknappheit (blau). (Quelle: [Penning de Vries 2003])

2.2 Politische und sozioökonomische Auswirkungen

2.2.1 Auswirkungen von Wasserknappheiten

Die Folgen von ungenügender Versorgung mit sauberem Trinkwasser für den Menschen sind groß. Es kommt vermehrt zu Krankheiten und damit in Verbindung stehenden Faktoren, wie erhöhter Kinder- und Jugendsterblichkeit. Etwa 80 % der Krankheiten in ärmeren, südlichen Ländern sind auf unsauberes Wasser und unzulängliche sanitäre Einrichtungen zurückzuführen; etwa 5000 Kinder sterben täglich wegen unzureichender Wasserver- und -entsorgung.²⁷

²⁷ „UN erinnert an weltweiten Wassermangel“, netzeitung.de vom 20.3.2008

Infektionskrankheiten, die auf unsauberes Trinkwasser zurückzuführen sind, können von Bakterien (Shigellose, Legionärskrankheit, Cholera, Typhus), Viren (Meningitis, Hepatitis, Poliomyelitis) oder Würmern (Schistosomiasis, Filariose (Medinawurmbefall, Elephantiasis), Asakardienbefall) ausgelöst werden. Gerade in ländlichen Gegenden, besonders in Afrika, ist das vom Menschen, teils ohne vorherige Desinfektion oder Entkeimung, genutzte Wasser Entstehungsort und Verbreitungsweg für Infektionskrankheiten. Großbauprojekte und Staudämme, die einerseits der Bevölkerung eine Bewässerung ihrer Felder und damit ein besseres Einkommen ermöglichen, sorgen andererseits auch für eine verstärkte Verbreitung von Krankheitserregern. Nach dem Bau des Assuan-Staudamms in Ägypten hat z. B. das Risiko, an Schistosomiasis (ehemals als Bilharziose bezeichnet) oder Malaria zu erkranken, deutlich zugenommen. Ähnlich erhöhte Gesundheitsrisiken ergaben sich auch nach dem Bau anderer Staudämme [Fenwick 2006].

Auswirkungen: etwa 5.000 Kinder sterben täglich mangels sauberen Wassers

Internationale Bemühungen zur Ausrottung solcher Krankheitserreger zeigen zumindest in einigen Bereichen Erfolge. Der Medinawurm (auch als Guineawurm bezeichnet) gilt als weitgehend ausgerottet, nur aus dem Sudan und Ghana sind noch größere Erkrankungszahlen berichtet worden, welche seit den letzten Jahren ebenfalls klar rückläufig sind. Diese Erfolge sind auf Verbesserung der hygienischen Systeme und auf die großflächige Verwendung von Larviziden zurückzuführen [Fenwick 2006].

Internationale Bemühungen, pathogene Erreger auszurotten

Eine weitere direkte Folge von Wasserknappheiten können landwirtschaftliche Produktionsausfälle von unterschiedlichen Schweregraden sein, denn die Lebensmittelerzeugung und die Landwirtschaft sind eng mit der Wasserproblematik verzahnt. In der Nähe großer Städte kann es zu einer Konkurrenzsituation zwischen dem Wasserbedarf der Einwohner und dem landwirtschaftlichen Bedarf kommen. Einige Großstädte sind bereits dazu übergegangen, Wasserrechte von landwirtschaftlichen Betrieben käuflich zu erwerben. So hat sich die kalifornische Stadt San Diego für 75 Jahre die Rechte für 247 Millionen Tonnen Wasser pro Jahr von Farmern des nahegelegenen Tales Imperial Valley gesichert [Brown 2008]. Die Stadt bietet in diesem Fall einen deutlich höheren Preis, als mit der Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen verdient werden könnte. In Folge dessen liegt fruchtbares Farmland brach, da es nicht mehr bewässert werden kann. Auch Bauern in anderen Regionen müssen sich mit immer weniger Wasser für die Bewässerung ihre Felder begnügen, weil angrenzende Städte rechtlich oder finanziell in einer besseren Ausgangslage sind, um mehr Wasser für ihre Bewohner zu erhalten.

Weitere Auswirkungen; Landwirtschaftliche Einbußen

Extreme Klimabedingungen können zu Dürren und damit zu Ernteausfällen führen. In Ländern, die dauerhaft an Wasserknappheit oder Wassermangel leiden, kann es auch zu Engpässen in der Versorgung mit Nahrungsmitteln und daraus resultierender Mangel- oder Unterernährung

kommen. Weltweit gelten etwa 80 Millionen Menschen als unterernährt. Problematisch wirkt sich vor diesem Hintergrund auch eine starke Zunahme der Bevölkerung aus. Diese Zunahme ist besonders groß in sehr trockenen afrikanischen Ländern, in denen Wasser ohnehin eine knappe Ressource ist und Nahrungsmittel importiert werden müssen. Länder wie China, Indien oder Mexico haben den wachsenden Bedarf an Nahrungsmitteln in den letzten Jahrzehnten teils durch Übernutzung der natürlichen Wasserressourcen befriedigen können. In Zukunft könnte sich dies ändern, wenn die Wasserressourcen nicht einer nachhaltigen Bewirtschaftung zugeführt werden.

Fischfang als
Lebensgrundlage
benötigt Wasser

Allgemein sind gerade in ländlichen Regionen mit einem sehr geringen Wasserdargebot die Einkommensmöglichkeiten limitiert und der Lebensstandard gering. Die Verknappung von Wasser und die Störung des aquatischen Lebens in Folge von anthropogenen Eingriffen, wie z. B. beim Aralsee, hat negative Folgen für den Menschen. Aufgrund sinkender Fischbestände, Versalzung und starker Verschmutzung des noch verbliebenen Wassers entfallen in diesem konkreten Beispiel Möglichkeiten, den Fischfang als Lebensgrundlage zu etablieren. Hafenstädte und Badeorte haben sich in Wüstenstädte verwandelt. Viele Bewohner der Region leiden an chronischen Erkrankungen, und auch die Kindersterblichkeit ist sehr hoch.

Wasser für den
Tourismus ist ein
zweischneidiges
Schwert

Wasser spielt auch in vielen anderen Bereichen eine wichtige Rolle, wie z. B. im Tourismus. Der Tourismus kann für eine Region oder ein Land viele positive Effekte bringen und Beschäftigung sichern. Andererseits entsteht mitunter ein enorm übersteigerter Bedarf an Wasser für den direkten Gebrauch durch die Gäste oder indirekt für die Bewässerung, z. B. von Golfanlagen oder Hotelparks. In trockenen Gebieten des Mittelmeerraums ist dieses Problem schon evident geworden, die Flüsse in Spanien und Italien zeigen immer wieder sehr niedrige Pegelstände. Ebenfalls problematisch sind die entstehenden Abwässer, denn sie werden oft nicht gereinigt, sondern ungeklärt in Flüsse oder Meere abgeleitet. Es kann zu Schädigungen der marinen Ökologie kommen, wie z. B. dem Absterben von Korallenriffen, die letztendlich die Basis für den Tourismus gebildet haben. Ist das bereiste Land schließlich von Natur aus wasserarm, wie z. B. Israel, entstehen leicht Versorgungsengpässe, oder es kommt zur Ressourcübernutzung mit teils irreparablen ökologischen Schäden. In Folge dessen wird auch der Tourismus beeinträchtigt und Besucher können ausbleiben.

Wasserknappheit kann außerdem die industrielle Entwicklung behindern oder ganz verhindern. Die meisten Industriezweige sind auf das Vorhandensein größerer oder kleinerer Mengen an Wasser angewiesen. Es kann z. B. zu Kühlzwecken, als Waschwasser oder als Rohstoff benötigt werden.

2.2.2 Gemeinsame Nutzung von Wasser

Ein erhöhtes Konfliktpotenzial kann entstehen, wenn angrenzende Staaten knappe Wasserressourcen teilen müssen, denn Wasser setzt sich über von Menschen gezogene Grenzen hinweg. Auseinandersetzungen um die Verteilung von Wasser (Wasserverteilungskonflikte) sind komplexe Phänomene, die meist in größere Konflikte der Region eingebunden sind und von territorialen, wirtschaftlichen, demografischen und auch militärischen Gesichtspunkten getragen werden. Dispute um Wasser müssen nicht zwingend in kriegerischen Auseinandersetzungen (Wasserkriege) enden. Zwischenstaatliche Kriege um Wasser sind eher die Ausnahme, die Regel sind multilaterale Kooperationen zwischen Anrainerstaaten oder eine grenzüberschreitende Wassernutzung. Die Water Treaties Datenbank der Universität Oregon listet 400 Wasserabkommen auf. Zu den seit langem über die Nutzung gemeinsamer Wasserressourcen verhandelnden Ländern gehören die Nil-Anrainerstaaten, Pakistan und Indien (das Wasser des Indus), die Anrainerstaaten des Euphrat-Tigris-Becken (Türkei, Syrien, Irak) [Blasshofer 2002] und auch Konsortien rund um den Mekong (Kambodscha, Laos, Thailand, Vietnam).

Zwischenstaatliche Kriege um Wasser sind die Ausnahme, multinationale Kooperationen häufig

Nur 37 akute Konflikte um Wasser sind in den letzten fünfzig Jahren registriert worden, davon 30 im Nahen Osten.²⁸ Bei 21 dieser Konflikte kam es zu militärischen Operationen, in 18 Fällen war Israel beteiligt. Bei den meisten kriegerischen Auseinandersetzungen geht es fast nie ausschließlich um Wasser, Lösungen werden oftmals durch territoriale Streitigkeiten verhindert. Beispielsweise ist Wasser zwar nicht der Grund für Israel gewesen, die syrischen Golan-Höhen zu besetzen, jedoch der Hauptgrund, nicht wieder abzuziehen [Fröhlich 2006]. Die Golan-Höhen sind Einzugsgebiet des Sees Genezareth, von dem Israel ein Drittel seines Wassers bezieht. Israel kontrolliert nach der Eroberung des von Jordanien verwalteten Westjordanlandes (und des Gaza Streifens) seit dem Sechstage-Krieg (1967) alle wichtigen Wasservorkommen der Region, die auch für den Libanon, Syrien und Jordanien elementar sind.

37 akute Konflikte um Wasser in den letzten 50 Jahren

2.2.3 Politische Entwicklungen

Im September 2000 haben sich die Mitgliedstaaten der Vereinten Nationen auf acht Entwicklungsziele bis zum Jahr 2015 geeinigt: die so genannten Millenniumsziele (Millennium Development Goals) für eine zukunftsfähige und nachhaltige Weltentwicklung. Eines der Ziele ist die Halbierung der Anzahl an Menschen, die keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser haben. Das Millenniumsziel Wasser ist eng verbunden mit anderen Zielen, wie der Halbierung der Armut und des Hungers. Um die

Ein Millenniumsziel der Vereinten Nationen: Halbierung der Anzahl an Menschen ohne Zugang zu sauberem Wasser

²⁸ vgl. die Transboundary Freshwater Dispute Data Base.
(<http://www.transboundarywaters.orst.edu/>)

Ziele besser erreichen zu können, hat die UNO das Jahrzehnt 2005-2015 zur Aktionsdekade „Wasser für Leben“ (Water for Life) ausgerufen. Ein Leitgedanke hierbei ist die nachhaltige Bewirtschaftung der Ressource Wasser. Bereits im Jahr 1987 hat die Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (die so genannte Brundtland-Kommission) den Grundstein für eine breite öffentliche Nachhaltigkeitsdebatte gelegt, die bis heute anhält. Mit den beiden UN-Konferenzen zu Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro (1992) und Johannesburg (2002) hat sich die internationale Staatengemeinschaft schließlich der Umsetzung des Leitbilds der nachhaltigen Entwicklung verschrieben.

Eine besondere Rolle kommt den technologischen Innovationen zu. Diese werden unter anderem von gesetzlichen Vorgaben vorangetrieben. Strengere Umweltauflagen oder das Verbot bestimmter Substanzen haben immer wieder dazu geführt, dass neue Technologien zeitnah entwickelt und eingesetzt wurden.

Richtlinien und
Gesetze regeln in
Europa den Umgang
mit der Ressource
Wasser

Der europäische Rahmen beinhaltet z. B. die EU-Wasserrahmenrichtlinie, die Richtlinie über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IPPC Integrated Pollution Prevention and Control, IVU Richtlinie), die Richtlinie über die Behandlung kommunaler Abwässer und die Grundwasserrichtlinie. Die europäische Wasserrahmenrichtlinie verlangt eine integrierte Bewirtschaftung der Gewässer in den Grenzen der großen Flusseinzugsgebiete, orientiert am Immissions- und Effizienzprinzip. Voraussichtlich werden zwei Drittel der europäischen Gewässer nicht ohne Maßnahmen die Ziele der Wasserrahmenrichtlinie 2015 erreichen. In Deutschland beinhaltet dies etwa 50 % des Grundwasserkörpers und 50 % der Oberflächengewässer [BMU 2006a]. Die IUU-Richtlinie regelt die Genehmigung umweltrelevanter Industrieanlagen; ein wichtiges Element ist die Forderung der Verwendung der „Besten Verfügbaren Techniken“ (BVT) bei allen neuen Anlagen und spätestens seit 2007 auch bei allen bestehenden Anlagen.

Entsprechend der übergeordneten Stellung des europäischen Rechts wird die deutsche Gesetzgebung schrittweise angepasst, die wichtigsten Eckpunkte sind im Wasserhaushaltsgesetz, der Trinkwasserverordnung, der Grundwasserverordnung oder der Abwasserverordnung zu finden. In der Abwasserverordnung wird beispielsweise geregelt, welche Stoffe aus häuslichen Abwässern und den verschiedenen Industriebranchen abgeleitet werden dürfen.

2.3 Exkurs: Konzept des virtuellen Wassers

Virtuelles Wasser bezeichnet das in Produkten enthaltene oder zu deren Herstellung notwendige Wasser. Fast jedes Produkt enthält virtuelles Wasser. Die Fertigung eines Automobils braucht ca. 400.000 Liter Wasser, ein Kilo Käse enthält etwa 5.000 Liter Wasser, ein Kilo

Virtuelles Wasser als
Konzept zur
Reduktion des
Wasserverbrauchs

Rindfleisch etwas 16.000 Liter Wasser und für die Erzeugung von einem Kilo Getreide werden zwischen 1.000 und 5.000 Liter Wasser benötigt [Sachs 2005]. Die Menge an Wasser, die zur Herstellung eines Produktes nötig ist, hängt von geografischen, klimatischen, ökologischen, technologischen und weiteren Faktoren ab. Für ein Kilogramm Mais werden in Frankreich z. B. 530 Liter Wasser benötigt, in Ägypten hingegen wegen der hohen Verdunstung 1.100 Liter Wasser [Horlemann 2006]. Daraus ergäben sich enorme Einsparungsmöglichkeiten in Bezug auf den Wasserverbrauch, wenn in diesem Fall Frankreich den Mais exportieren und Ägypten ihn importieren würde.

2.4 Herausforderungen

Die zentralen Herausforderungen an den Menschen im Wasserbereich lassen sich grob in drei Bereiche unterteilen:

Versorgung der Menschen mit Trink- und Brauchwasser

Wasser ist von elementarer Bedeutung für den Menschen. Die ungenügende Versorgung mit sauberem Trinkwasser führt zu gesundheitlichen Gefährdungen, vermehrten Infektionen und meist auch einem Nahrungsmittelmangel. Die weltweite Versorgung mit sauberem Wasser, wie auch im Rahmen der Millenniumsdebatte gefordert, ist die Grundlage für eine nachhaltige und zukunftsfähige Entwicklung der Menschheit.

Sicherung des Wasserkreislaufs

Ein intakter Wasserkreislauf ist essenziell für die Gewässerneubildung, die Selbstreinigungsleistung und auch die Hochwasserregulierung. Nur ein Fünftel der Gewässer in Deutschland befindet sich in einem naturnahen Zustand [BMU 2006c]. Nur wenn rechtzeitig und nachhaltig für eine Erneuerung der Wasserreserven gesorgt wird, kann Wasser auch dauerhaft vom Menschen entnommen werden.

Reduktion der Gewässerverschmutzung

Der zunehmende Verschmutzungsgrad der Gewässer wirkt sich schädigend auf Mensch und Umwelt aus, angereicherte Substanzen können zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen. Viele persistente Substanzen lagern sich im Grundwasser an und können dort Jahrzehnte unverändert verbleiben, sich anreichern und über die Nahrungskette zum Menschen gelangen. Eine Reduktion der Gewässerverschmutzung, z. B. durch bessere Reinigungsverfahren, ist daher elementar.

3 STRATEGIEN UND TECHNOLOGISCHE BEITRÄGE

Den Herausforderungen der Wasserversorgung und -entsorgung kann langfristig nur mit einer umfassenden Sichtweise begegnet werden, die auch ökonomische, soziale und ökologische Faktoren beinhaltet [Brundtland 1987, Klaphake 2001, Grobosch 2003]. Technologische Strategien, die zu einer nachhaltigeren Bewirtschaftung der Ressource Wasser führen, lassen sich grob in drei Bereiche einteilen, die unterschiedliche Ansätze erfordern und an verschiedenen Stellen der Wertschöpfungskette ansetzen: die Minimierung des Wasserverbrauchs, die Maximierung der Wasserverfügbarkeit sowie Technologien zur Wasseraufbereitung und -gewinnung. Diese werden im Folgenden für das industrielle, kommunale und private Umfeld anhand ausgewählter Beispiele dargestellt. Für die technischen Details wird an entsprechender Stelle auf weiterführende Literatur verwiesen.

Umfassende
Sichtweise
erforderlich

3.1 Minimierung des Wasserverbrauchs

Jeder Liter Wasser, der nicht verwendet wird, muss auch nicht gereinigt werden. Die Abwasserreinigung ist ein teurer und zeitintensiver Prozess und bringt meist weder einem Unternehmen noch einem Privathaushalt einen direkten Gewinn. Wasser jeglicher Qualität sollte daher eingespart und Abläufe soweit optimiert werden, dass der Wasserbedarf reduziert wird. Im Idealfall bedeutet das eine vollständige Vermeidung jeglichen Wassers, z. B. in industriellen Prozessen durch Substitution oder im Privatbereich durch Änderung von Verbrauchsgewohnheiten (Vermeidung und (Prozess-) Substitution). Ist eine Abweichung vom Idealbild unumgänglich, so steht der sparsame und minimale Einsatz der Ressource im Mittelpunkt der Betrachtung (Optimierung und Effizienzsteigerung). Die Vermeidung von Abwasser ist hierbei ein weiterer Leitgedanke, der im industriellen Umfeld schon erfolgreich praktiziert wird.

Sparsamer und
nachhaltiger Umgang
mit der Ressource
Wasser

3.1.1 Prozess- und Produktionsintegrierte Maßnahmen

Prozessintegrierte Maßnahmen dienen der Minimierung oder, im günstigsten Fall, der Vermeidung der Bildung von Reststoffen während des Produktionsprozesses. Zu den Maßnahmen gehören die Trennung von Teilströmen, die Kreislaufführung, die Rückführung von Hilfsstoffen (Waschwasser, Trägergase, Lösungsmittel, Katalysatoren) und Produkten, der Einsatz von Reststoffen zur Produktion anderer Stoffe oder zur Energieerzeugung, neue Synthesewege, der Einsatz neuer und umweltfreundlicherer Reagenzien, die Optimierung von alten Reaktionen, der Einsatz von Katalysatoren sowie eine Verbesserung der Anlagentechnik.

Kreislaufführung,
Trennung von
Teilströmen und
Rückführung von
Hilfsstoffen

Schließung von
Stoffkreisläufen
senkt den
Wasserverbrauch

In den Jahren 1991 bis 1998 konnte der spezifische Wasserverbrauch, d. h. der Verbrauch pro Tonne eines Produktes alleine durch die Schließung von Stoffkreisläufen in der Industrie um 42 % verringert werden [Ploetz 2002]. Es ist davon auszugehen, dass künftig produktions- und produktintegrierte Ansätze, die mit einem integrierten Umweltschutz einher gehen, im Mittelpunkt stehen werden, während heute noch die nachgeschalteten Abwasserbehandlungen (end-of-pipe) im Vordergrund stehen [Braun 2002].

Teilströme können
gesammelt und
spezifisch gereinigt
werden

Besonders die **Trennung von Teilströmen** im Rahmen eines Abwassermanagements ist sinnvoll. Hochbelastete Teilströme aus Synthesen können gesondert gesammelt und spezifisch gereinigt werden; eine Produkt- oder Wertstoffrückgewinnung ist denkbar, und die Entstehung problematischer Mischabwässer kann verringert werden. Die Trennung von Teilströmen kann sogar zwingend erforderlich sein, wenn die Entstehung gefährlicher Stoffe zu befürchten ist. Ein Beispiel ist die Bildung von Blausäure aus Cyaniden in Metallbetrieben [Rudolph 2001].

Wasser sparende Verfahren, wie die Kaskadenspülung werden z. B. für die Spülung von Werkteilen in der Galvanik eingesetzt. Das zu spülende Werkstück und das Spülwasser werden über einige Spülbereiche im Gegenstrom geführt.

Optimierung in der
Industrie während
der Extraktion und
dem Spülen

Bei der Produktwäsche in der chemischen Industrie ist die Waschwassermenge im Allgemeinen um ein Vielfaches höher als die Produktmenge. Durch die Optimierung von Extraktionsprozessen oder den Einsatz der Gegenstromextraktion, der auf einem ähnlichen Prinzip basiert wie die Kaskadenspülung, kann eine Reduktion der Spül- und Abwassermenge erreicht werden. Das Ausmaß der Einsparung hängt von den spezifischen Bedingungen ab [BVT 2003b].

In der Textilindustrie trägt das kontinuierliche Färben im Gegensatz zum diskontinuierlichen Färben zu einer Verringerung des Wasserverbrauchs bei [BVT 2003a].

Die Pinch Methode ermöglicht die Wieder- bzw. Weiterverwendung von heißen und kalten Prozessströmen durch eine energetische Kopplung; auch die Destillation über mehrere Kolonnen kann energetisch gekoppelt werden [BREF 2005].

Längere Lebensdauer
z. B. galvanischer
Bäder senkt den
Wasserverbrauch

Die **Lebensdauerverlängerung** von Prozessbädern in metallverarbeitenden Betrieben, wie Lackierereien, Härtereien und Verzinkereien kann die Abwassermenge begrenzen. Die Standzeiten der Prozessbäder werden durch zwischengeschaltete Entfernung störender Schadstoffe (z. B. mit Aktivkohle und elektrolytischer Reinigung) verlängert.

Die **Mehrfachverwendung, das Recycling und die Kreislaufführung** z. B. von Spülwasser und Prozesswasser hilft, die einzusetzende Wassermenge zu begrenzen. Das Spülwasser kann mit Ionentauschern

oder Filtermembranen gereinigt und dem Spülprozess wieder zugeführt werden. Ein Beispiel für das Potenzial dieser Technik sind die Wassereinsparmaßnahmen einer Wäscherei in Olsberg. Der Wasserverbrauch ist um 53 % pro Kilo Wäsche geringer als zuvor; die jährlichen Kosten konnten um 40.000 Euro gesenkt werden. Die Wäschereiabwässer werden durch Filtration aufgereinigt und der noch heiße Wasserdampf erneut zur Textilreinigung eingesetzt. [BMU 2006d].

Die Wiederverwendung von gering belastetem Abwasser, wie Reaktionswasser, Destillaten, Filtraten und Reinigungswasser von Wartungsarbeiten in anderen Prozessen sowie die lokale Eliminierung von Substanzen an kritischen Stellen nahe dem Entstehungsort ist ein weiteres Optimierungsverfahren.

Die Kombination von Stoffstromtrennung, Kreislaufführung, sparsamen Spülmethode und Lebensdauererlängerung von Prozessbädern führt zu maximalen Einsparungen und evtl. sogar zu vollständig abwasserfreien Prozessen. Ein Beispiel ist die Abkochentfettung für Metallteile in der Galvanik, bei dem die Prozessbäder mittels Membranfiltration gereinigt, Öle und Fette in einem Ölabscheider abgetrennt werden und optimierte Tensid-Mischungen zur Reinigung der Metalloberflächen zum Einsatz kommen [Brunn 1998, BREF 2005b].

Kombination der einzelnen Verfahren führt zu maximalen Einsparungen

Einführung neuer Verfahren oder Synthesewege

Der Ersatz chemischer durch **biotechnologische Verfahren** kann ökonomische Vorteile mit sich bringen und zu einer Reduktion der Umweltbelastung führen [OECD 2001, Hoppenheidt 2004]. Im Allgemeinen sind weniger Syntheseschritte nötig, und eine chemische Vorbehandlung (z. B. Einführung von Schutzgruppen) oder Nachbehandlung (z. B. Aufreinigung) ist oft nicht erforderlich. Enzyme arbeiten unter milden Bedingungen und brauchen wenig Lösungsmittel. Sie können frei in Lösung, fixiert auf einen Träger oder als Teil des biologischen Produktionssystems einer Zelle verwendet werden. Zu unterscheiden sind fermentative Verfahren, die Biotransformation von Vorstufen mit wachsenden oder ruhenden Zellen, bzw. Enzymen sowie die Biosynthese mit Hilfe gentechnisch modifizierter Organismen.

Biotechnologische Verfahren können Chemische verdrängen

Biotechnologische Verfahren werden heute bei der Herstellung von Riboflavin (Vitamin B₂), essentiellen Aminosäuren, Biopestiziden, Feinchemikalien [BACAS 2004] oder der Synthese von Polyacrylamiden eingesetzt. Die traditionelle chemische Synthese dieses Polymers erreicht eine Ausbeute von maximal 80 %, die biotechnologische Herstellung bis zu 100 %; etwa 50 % der Gerätekosten werden gespart, es ist weniger Abwasser zu reinigen, und kein giftiger Metallkatalysator muss eingesetzt werden [US Department of Commerce 2003].

Biotechnologische Herstellung von Aminosäuren und Feinchemikalien

In der Waschmittelindustrie haben sich enzymhaltige Formulierungen durchgesetzt, denn sie ermöglichen schon bei niedrigen Temperaturen und moderatem Wassereinsatz eine Reinigungsleistung, die mit traditionellen Waschmitteln nicht zu erreichen ist [Hoppenheidt 2004].

Einsatz von Enzymen
in der Textilindustrie

In der Textilindustrie können Wasser, Chemikalien und Energie durch den Einsatz von Enzymen eingespart werden. Das enzymatische Entbasten von Seide führt im Vergleich zur traditionellen Methode in heißer Lauge zu weniger Abwasser und einem geringeren Energieverbrauch. Die enzymatische Entfernung des Bleichmittels H_2O_2 mit Peroxidasen und Katalasen hat die Marktreife erlangt [Gaisser 2002].

Umgestaltung von
organischen
Synthesen spart
Wasser

Organische Synthesen lassen sich oft derart umgestalten, dass Wasser zumindest teilweise ersetzt werden kann. Ein Beispiel ist die Sulfonierung von Alkoholaten oder Ethoxylaten mit SO_3 in der Gasphase. Im Vergleich zu herkömmlichen Sulfonierungen in Lösung (als Lösungsmittel dienen Methylenchlorid oder Dichlorethan) mit anschließender wässriger Extraktion fällt keine Mutterlauge und weniger Washwasser an. Außerdem werden keine halogenierten Lösungsmittel verwendet, die aufgereinigt oder entsorgt werden müssen. Ein anderes Beispiel ist die trockene Acetylierung in Acetanhydrid anstelle der traditionellen Acetylierung in wässriger Lösung und Aussalzung mit Ammoniumsulfat [BREF 2005a].

Hochdruckgestützte
Technologien finden
Verwendung in der
Sterilisation und
Pasteurisierung

Die Anwendung **hochdruckgestützter Technologien** in der Lebensmittelindustrie kann zu einer Prozessbeschleunigung, höherer Prozesshomogenität und Steigerung der Produktsicherheit und -qualität bei gleichzeitiger Ressourcenschonung führen. Die für das Auftauen von Fischen erforderliche Menge an Wasser kann so beispielsweise um 90 % reduziert, die Prozesszeiten verkürzt und die Abwasserbelastung verringert werden. Die Verfahren setzen die Kenntnis von Phasen- und Zustandsänderungen unter Einfluss von hydrostatischem Hochdruck voraus. Anwendungsgebiete liegen in der Sterilisation und Pasteurisierung, der Inaktivierung von Enzymen sowie der Beeinflussung von Phasenübergängen an der Phasengrenze zwischen flüssigem und festem Zustand [Schlüter 2003, Kowalczyk 2004].

Weitere viel versprechende Technologien zur Konservierung von Lebensmitteln beinhalten die Ultraschalltechnologie und gepulste elektrische Felder.

Weitere Verfahren

Die Verwendung von trocken laufenden Vakuumpumpen verringert die Menge an entstehendem Abwasser deutlich. Trocken laufende Pumpen werden heute überwiegend in der Pharma-Industrie und bei der

Produktion von Feinchemikalien sowie überall dort eingesetzt, wo die Pumpe für viele unterschiedliche Synthesen verwendet werden soll. Das Vakuum-System sollte unabhängig von den gepumpten Chemikalien sein, bei nass laufenden Pumpen (Wasser, Öl) kommt es immer zu einer Verunreinigung [Kösters 2006]. Kreislaufführungen sind technisch ebenfalls realisierbar [BVT 2003b].

Der Ersatz gefährlicher Substanzen durch ungefährlichere Stoffe führt zur Entstehung geringerer Mengen Abwasser und Abfall. Gesetzliche Vorgaben führten dazu, dass Substanzen wie Hexachlorbenzol, das sich in Fischen mit dem Faktor 1:1.000.000 anlagert, Vinylchlorid zur Herstellung von PVC, Schwermetalle oder Organohalogenverbindungen nicht mehr ins Abwasser gegeben werden dürfen und entsprechend substituiert wurden.

Ersatz von Wasser als Kühlmittel

Die Kühlung von Prozessen kann direkt oder indirekt erfolgen. Bei der direkten Kühlung zur Kondensation von Dämpfen wird Kühlwasser in die Gasphase der chemischen Reaktionen eingespritzt. Für die Kühlung von einer Tonne Dampf auf 35 °C werden etwa 27 m³ Wasser benötigt. Durch den direkten Kontakt von Kühlwasser und Dampf aus der Reaktion entstehen entsprechend große Mengen an Abwasser. Diese Kondensatorkühlung mit Wassereindüsung kann durch einen Oberflächenwärmetauscher substituiert werden. Eine vollständige Trennung der Kreisläufe ist die Folge, und das Kühlwasser wird nur noch thermisch belastet [BVT 2003b].

Trennung von
Kreisläufen reduziert
den Wasserbedarf
zur Kühlung

Die indirekte Kühlung ist nicht für alle Prozesse gleichermaßen geeignet. Bei der Diazotierung von Aminen ist beispielsweise aus Sicherheitsgründen die konstante Zugabe von Eis erforderlich.

Ersatz von Wasser als Lösungsmittel

Wasser ist ein hervorragendes Lösungsmittel für eine Vielzahl von Stoffklassen, es ist von ubiquitärer Verfügbarkeit und hat keine schädliche Wirkung auf die Umwelt. Es findet Anwendung als Reaktionsmedium, z. B. in der Textilindustrie, der Papierindustrie oder bei der Herstellung von Feinchemikalien. Zur Eindämmung des Wasserverbrauchs und zur Kostenreduzierung wird vom DECHEMA-Arbeitskreis „Alternative Lösungsmittelsysteme für technische Anwendungen“ untersucht, inwieweit sich Prozesse vollständig oder teilweise vom Wasserkreislauf abkoppeln und andere Trägersubstanzen, wie Gase, überkritische Fluide oder ionische Flüssigkeiten in Reaktionen einsetzen lassen [DECHEMA 2006].

Wasser ist ein
hervorragendes
Lösungsmittel

Überkritische Fluide
können Wasser als
Lösungsmittel
ersetzen

Überkritische Fluide sind Stoffe, die sich im Phasendiagramm jenseits des kritischen Punktes (stoffspezifische Temperatur und Druck) befinden. Sie besitzen Eigenschaften des gasförmigen (niedrige Viskosität) und des flüssigen (relativ hohe Dichte) Zustandes und zeichnen sich durch gute Lösungsmittelleigenschaften aus. Beim Unterschreiten der kritischen Daten verliert das Fluid seine Lösungsmittelleigenschaften und lässt sich im gasförmigen Zustand rückstandslos vom Produkt abtrennen und nahezu vollständig zurückgewinnen. Es fällt kein Abwasser an, eine Produkttrocknung ist nicht erforderlich, und das Gas kann erneut eingesetzt werden.

Überkritisches CO₂
geeignet für
zahlreiche
Anwendungen, z. B.
Textilfärbung

Für viele Anwendungen hat sich überkritisches Kohlendioxid (CO₂) als geeignet erwiesen; es hat eine niedrige kritische Temperatur (31 °C), ist leicht zu transportieren, nahezu unbegrenzt verfügbar, nicht brennbar, billig und physiologisch unbedenklich. Es findet Verwendung in der Entkoffeinierung von ungerösteten Kaffeebohnen, der Behandlung von Hopfen vor dem Brauen (Entzug von Bitterstoffen), in der Extraktion von duft- oder hitzeempfindlichen Stoffen [BVT 2003a], der Reinigung von Korken für Weinflaschen²⁹ oder der Extraktion von Uran und Plutonium aus radioaktiven Abfällen³⁰. Es wird für Alkylierungen, Hydroformylierungen und Säure-katalysierte Reaktionen erprobt sowie zur Reinigung von Maschinenteilen und bei der Behandlung von Polymeren herangezogen [Dahmen 2001]. Auch in der Textilindustrie ist überkritisches CO₂ zur Veredelung in der Erprobung. Der Gardinenhersteller ADO International, das Deutsche Textilforschungszentrum Nord-West und der Anlagenhersteller Uhde Hochdrucktechnik entwickeln das Verfahren zum Färben im industriellen Maßstab weiter [Ploetz 2002]. Weitere Branchen, die überkritische Fluide einsetzen, sind die Pharmazeutische Industrie, die Lebensmittelindustrie, die Kosmetikindustrie und die chemische Industrie.

Ionische Flüssigkeiten
lösen viele
Substanzen sehr gut

Ionische Flüssigkeiten sind Salzschnmelzen, die sich durch Schmelzpunkte unter 100 °C und eine niedrige Viskosität auszeichnen. Sie bestehen typischerweise aus einem stickstoffhaltigen heterozyklischen Kation und einem anorganischen Anion³¹ und eignen sich als Lösungsmittel für zahlreiche Substanzen [Weil 2004]. Ionische Flüssigkeiten haben meist einen extrem niedrigen Dampfdruck und sind als nicht flüchtig einzustufen. Sie sind nicht brennbar und mit vielen organischen Lösungsmitteln nicht mischbar, was die Grundlage für Zwei-Phasen-Systeme ist. Ionische Flüssigkeiten können z. B. für Diels-Alder-

²⁹ http://www.getraenke-test.de/news/content.php?subaction=showfull&id=1082390753&archive=&start_from=&ucat=1&

³⁰ <http://www.wissenschaft.de/wissen/news/225746.html>

³¹ http://www.ionicliquids-merck.de/servlet/PB/show/1462150/IL-Brosch%FCre_Merck_08.2005.pdf

Cyclo-Additionen, Friedels-Craft-Acetylierungen, -Alkylierungen³², Bayer-Villiger Oxidationen und die Mannich-Reaktion eingesetzt werden [Willy 2004].

Verminderung von Abwasser & abwasserfreie Prozesse

Oft lässt sich die Entstehung von Abwasser gänzlich vermeiden, z. B. in der chlorfreien Zellstoffherstellung, der Altpapier- und Papierherstellung, der Rauchgasreinigung, der Fahrzeugreinigung, der Metalloberflächenbehandlung (Galvanik), der Mehrwegflaschenreinigung, dem Siebdruck und der Pulverbeschichtung [BMU 2006a].

Gänzliche Vermeidung von Abwasser

In der Textilfärberei können Hochtemperaturverfahren zur Färbung von Polyester und Polyestermischungen eingesetzt werden; ein Carrier (oftmals chlorierte Aromate, Biphenyle oder Phthalate) ist nicht erforderlich [BVT 2003a]. Das Carrier-freie Färben ist in Europa weit verbreitet.

Die abwasser- und chlorfreie Bleiche von Zellstoffen kann durch die Behandlung des Zellstoffs mit Ozon (O₃) in Verbindung mit Wasserstoffperoxid (H₂O₂) oder Peressigsäure erreicht werden. Das Ozon wird durch elektrische Entladung im Sauerstoffstrom erzeugt und trägt mit zu einem hohen Weißheitsgrad bei. Da die Ozonkonzentration nur etwa 15 % beträgt, sind große Mengen an Sauerstoff notwendig, was zu hohen Betriebskosten führt [BVT 2001]. Im Anschluss an die Ozonisierung kann eine weitergehende Behandlung mit H₂O₂ erfolgen.

3.1.2 Ersatz von Trinkwasser durch Betriebswasser

Betriebswasser ist Wasser, das technischen, gewerblichen oder landwirtschaftlichen Anwendungen dienen kann. Es besteht aus Regenwasser, Oberflächenwasser (aus Flüssen oder Seen), Grauwasser oder recyceltem Abwasser, hat keine Trinkwasserqualität, ist nicht für den menschlichen Genuss vorgesehen, erfüllt jedoch eine gewisse Mindesthygiene oder Reinheit entsprechend den Prozessanforderungen. Betriebswasser wird auch Nutzwasser oder Brauchwasser genannt. In Deutschland sind heute nur noch wenige öffentliche Betriebswassernetze neben den Trinkwassernetzen in Betrieb. Sie dienen der Bewässerung öffentlicher Grünanlagen, der Stadtreinigung oder werden gewerblichen und privaten Nutzern zur Verfügung gestellt. Die meisten kommunalen Betriebswassernetze sind aus Unwirtschaftlichkeit, niedrigen Trinkwasserpreisen und zu geringen Abnahmequoten stillgelegt worden.³³

Betriebswasser zur Bewässerung von Parks und zur Stadtreinigung

³² http://www.sigmaaldrich.com/aldrich/bulletin/al_chemfile_v5_n6.pdf

³³ <http://www.wasser-wissen.de/abwasserlexikon/b/brauchwasserbetriebswasser.htm>

Betriebswasser zur
Kühlung von
Kraftwerken

Regenwasser im
Privathaushalt -
Wirtschaftlichkeit
strittig

Im industriellen Umfeld wird Betriebswasser als **Kühlwasser** verwendet und direkt aus den Oberflächengewässern bezogen. Auch verarbeitende Gewerbe, wie z. B. die Baustoffherstellung, entnehmen den Flüssen Wasser zu Kühlzwecken.³⁴

Die Verwendung von **Regenwasser** anstelle von Trinkwasser erfreut sich in Privathaushalten und in den Kommunen steigender Beliebtheit. Das Regenwasser kann in Zisternen oder modernen Speichereinrichtungen gesammelt und zur Bewässerung, für die Autowäsche, die Toilettenspülung oder eventuell zum Wäsche waschen verwendet werden. Das Einsparpotenzial an Trinkwasser liegt je nach Angaben zwischen 25 und 40 Litern pro Tag und pro Person; der Gebrauch von Regenwasser ist daher auch für Privatpersonen interessant (vgl. Abbildung 13).

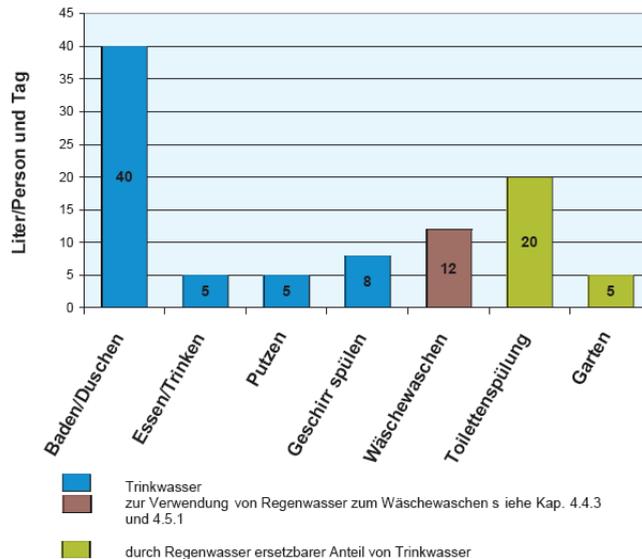


Abbildung 13: Einsparungspotenzial des Trinkwasserverbrauchs durch die Verwendung von Regenwasser. (Quelle [UBA 2005])

In wieweit eine Regenwasseranlage wirtschaftlich betrieben werden kann, hängt von diversen regionalen Faktoren wie Trink- und Abwassergebühren sowie Fördermöglichkeiten ab. Derzeit ist eine nicht bezuschusste Anlage im Allgemeinen als nicht rentabel einzustufen [UBA 2005].

Einige Beispiele für eine Regenwassernutzung in Deutschland sind: die Stadt Hamburg, die Stadt Frankfurt, der Frankfurter Flughafen, der Hessische Rundfunk, die UFA Film und TV Produktionsanstalt in Berlin [Rudolph 2001] oder das Frankenstadion Nürnberg, in dem Regenwasser

³⁴ http://www.econsense.de/PUBLIKATIONEN/PUBLIKATIONEN_MITGLIEDER/images/Heidelberg_Cement/HC_U_Bericht_04.pdf

von den Dächern, Wegen und Parkplätzen in drei unterirdischen Zisternen gesammelt und zur Bewässerung des Fußballfeldes benutzt wird [BMU 2006d].

Die Verwendung von **Grauwasser** im Rahmen einer Grauwasseraufbereitung wird im kommunalen und häuslichen Umfeld praktiziert. Eine Darstellung erfolgt in Kapitel 3.2.3.

3.1.3 Kommunale Infrastrukturmaßnahmen

Die Reparatur und Sanierung veralteter Rohrleitungen ist in industrialisierten Ländern mit zentraler Wasserver- und -entsorgung ein großes Problem. Die herkömmliche Bauweise zur Sanierung oder Reparatur sieht eine Offenlegung des Rohrs vor. Enorme Erdarbeiten sind notwendig; diese sind aufwändig, teuer und bedürfen der Instandsetzung des kompletten Oberbaus. An bebauten Stellen ist eine Grabung mitunter ausgeschlossen.

Veraltete
Rohrleitungen tragen
zu hohen
Wasserleitungs-
verlusten bei

Sanierung von Rohrleitungen

Die grabenlose Sanierung schadhafter Rohrleitungssysteme ist eine interessante und kostengünstige Alternative zu den Verfahren in offener Bauweise. Zu den bekannten Techniken gehören das Schlauch- sowie das Lang- und Kurzrohrrelining.

Grabenlose Sanierung
ist eine
kostengünstige
Alternative zur
offenen Bauweise

Beim Schlauchrelining, das heute bei etwa 80 % der Rohrsanierungen das Mittel der Wahl ist, wird ein Schlauch, bestehend aus einer Innenfolie (z. B. PVC), einem Trägermaterial (z. B. Glasfaser) und einer Außenfolie (z. B. PVC mit einem Epoxid Harz) in das zu reparierende Rohr eingezogen und mit Wasser oder Druckluft gegen die Rohrwand presst. Zum Einbringen des Schlauchs kann ein Seil verwendet werden (Einzugsverfahren) oder der Schlauch am Rohranfang befestigt und der Schlauch invertiert werden (Inversionsverfahren). Anschließend wird der Schlauch bei etwa 85 Grad Celsius ausgehärtet und erhält seine endgültige Festigkeit. Abbildung 14 stellt ein Beispiel eines Schlauchrelinings dar.

Relining Verfahren
zur grabenlosen
Rohrsanierung

Verschiedene Varianten dieser Basistechnik sind verfügbar; z. B. die Benutzung eines Kontrollschachts, die Kalt-Aushärtung des Schlauches, das Close-Fit-Relining, das Flexoren-Relining, das Noppenbahnrelining oder das Wickelrohrrelining [Winkler 2003]. Neben der Vermeidung von Erdarbeiten sind geringe Querschnittsverluste des Rohres, eine Verbesserung der Rohrstatik und die Vermeidung von Rohrverbindungen (muffenlos) Vorteile dieser Technik. Der mittels Schlauchrelining sanierte Kanal hat eine mittlere Lebensdauer von etwa 50 Jahren.

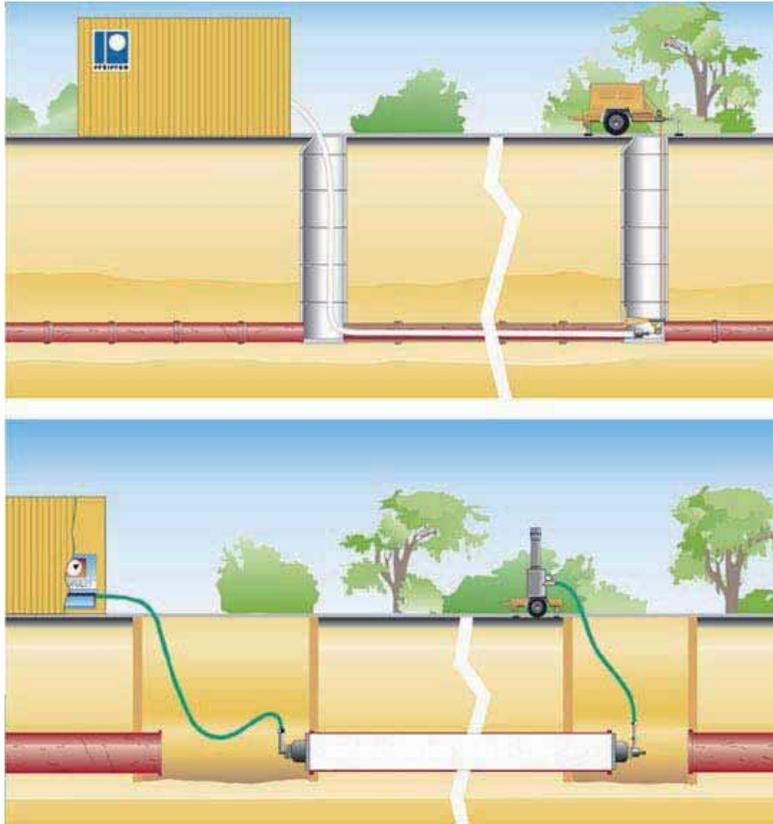


Abbildung 14: Beispiel eines Schlauchrelinings mit einem Glasfasergewebeschlauch.
(Quelle: Ludwig Peiffer³⁵)

Es gibt jedoch auch Techniken mit kurzen vorgefertigten Profilen (2-3 Meter Länge), die miteinander verbunden werden können. Diese Verfahren eignen sich besonders für begehbare Großprofile mit unterschiedlichen Profilformen und hohen statischen Anforderungen. Mittel der Wahl sind hier unter anderem Glasfaser-verstärkte Kunststoffe [Sieweke 2008].

Das Langrohrrelining arbeitet nach einem ähnlichen Prinzip, nur werden bei dieser Technik Kunststoffrohre in die zu sanierende Rohrleitung eingezogen. Diese bewährte Technik hat einen erhöhten Platzbedarf zur Vorfertigung und Verschweißung der Rohre.

Beim Flutungsverfahren werden in den sauberen Kanal nacheinander zwei Flüssigkeiten gepumpt. Die erste dringt in die Hohlräume und das Erdreich ein, und die zweite verbindet sich mit der ersten zu einem harten Konglomerat.

Verschiedene Relining
Verfahren

³⁵ <http://www.ludwigpeiffer.com>

Reparatur von Defekten in Rohrleitungen

Punktuelle Defekte können mit Teil-Inliner-Verfahren oder mit dem Injektionsverfahren repariert werden. Beim Teil-Inliner-Verfahren (auch als Kurzliner, Partliner oder partielles Inliner-Verfahren bezeichnet) werden kurze, in Kunstharz getränkte Schlauchstücke in das zu sanierende Rohr eingebracht und anschließend ausgehärtet, analog dem Schlauchrelining.

Reparatur
punktuelle Defekte
mittels Inliner
Verfahren

Das Injektionsverfahren beruht auf der Einspritzung von Zweikomponenten-Gelen in das Rohr, die selbstständig aushärten und die undichte Stelle verschließen. Für anfallende Bohr-, Fräs-, Spachtel- und Einspritzarbeiten, wie das Öffnen der Hausanschlüsse (auch beim Schlauch- und Langrohrrelining), können ferngesteuerte Roboteinheiten verwendet werden.

Weitere Verfahren beinhalten die Stützensanierung, die Muffenabdichtung oder das Anbringen von Dichtmanschetten [Winkler 2003].

Erneuerung von Rohrleitungssystemen

Die grabenlose Neuverlegung von Rohren lässt sich mittels ferngesteuerter Maschinen zum Vortrieb von Rohren (Microtunneling) realisieren. Von einem Startschacht aus wird ein Kanalschacht mit einem Vortriebsgerät unter Druck vorgetrieben. Der Abraum wird über eine Förderschnecke und ein Förderband durch das bereits verlegte Rohr über Tage transportiert.

Grabenlose
Neuverlegung z. B.
mittels
Microtunneling und
Berstliner-Verfahren

Das Berstliner Verfahren³⁶ kann bei undichten oder statisch nicht mehr tragfähigen Rohren angewandt werden. Ein Verdrängungskörper wird durch das zu ersetzende Rohr gepresst und zerstört dabei das Rohr. Die Rohrteile werden ins umliegende Erdreich verteilt. Das neu zu verlegende Rohr wird während des Berstvorgangs direkt in die alte Rohrtrasse eingezogen.

Alternativ kann das alte Rohr auch im hydros-Verfahren mit einer Zieheinheit aus dem Erdreich gezogen und das neue Rohr über ein Adaptersystem in das Erdreich eingebracht werden.³⁷

³⁶ http://www.a-brochier.de/de/inhalt/02_leistungen/rohr/leistungen.htm

³⁷ <http://www.kanalsanierer.de/verfahren.htm>

Robotische Einheiten
können schadhafte
Stellen finden

Monitoring

Schadstellen in Rohrleitungen und Brunnen und sogar kleine Risse können ferngesteuert mit robotischen Einheiten, die mit Kameras ausgerüstet sind, lokalisiert werden. Der Einsatz von so genannten Kanal-TV Systemen ermöglicht die Eingrenzung der Schadstelle auch an Orten, die anders nicht zu finden wären. Ein Georadarsystem, das mittels elektromagnetischer Impulse Hohlräume und Lagerungsdefekte ausmachen soll, ist in Erprobung.

3.1.4 Optimierungspotenziale in der Landwirtschaft

Wirkungsgrad von
Tröpfchenbe-
wässerung über 90 %.

Bewässerungssysteme

Die Wasserverluste in der landwirtschaftlichen Bewässerung sind enorm. So genannte Tropf- oder Mikrosysteme wurden in den 1940er Jahren in England entwickelt und applizieren das Wasser direkt im Wurzelbereich der Pflanze über durchlöchernte Kunststoffrohre. Verdunstungs- und Versickerungsverluste werden minimiert und einer Versalzung und Vernässung des Bodens vorgebeugt. Die Tröpfchenbewässerung braucht nur einen Bruchteil der Wassermenge, die Sprinkleranlagen verwenden. Zusätzlich ist der Energieaufwand für das Pumpen gering, da schon ein geringer Wasserdruck ausreicht. Der Wirkungsgrad von Tropfsystemen liegt bei über 90 %.



Abbildung 15: Tropfbewässerung im Kartoffelanbau. (Quelle: NetafimTM)³⁸

Eine Kombination von Bewässerung und Düngung mit der Tröpfchen-Methode („Fertigation“) lässt darüber hinaus eine wesentlich effizientere

³⁸ <http://netnew.rainland.co.il/4/>

Düngung der Pflanzen zu; die gelösten Nährstoffe werden direkt im Wurzelbereich ausgebracht. Israel gilt als führend im Bereich der Tropfsysteme, aber auch in vielen anderen Ländern werden sie mittlerweile eingesetzt.

Nanotechnologien

Besondere Bedeutung kommt neuartigen Bodenmaterialien, wie nanoporösen Zeoliten oder Silikaten zu. Sie können eine große Menge Wasser speichern (so genannte Superabsorber) und kontinuierlich im Wurzelbereich der Pflanzen abgeben. Andere nanostrukturierte Materialien, wie z. B. Aluminium-Silikat-Nanoröhren werden hinsichtlich ihrer Absorptionsfähigkeit von verschiedenen anorganischen Substanzen, wie Chloriden oder Phosphaten, die zum Wuchs von Unkraut notwendig sind, untersucht.

Nanoskalige
Bodenmaterialien
senken den
Wasserbedarf

Weiteren Innovationen aus den Nanotechnologien wird großes Potenzial bei der Einsparung von Betriebsmitteln wie Dünger, Pestiziden oder Herbiziden eingeräumt. Nanoskalige Kapseln, Röhren oder Käfige dienen dem Einschluss von Dünger oder anderen Mitteln, die dann zielgenau appliziert werden können und erst an der Pflanze ihre volle Wirkung entfalten (slow release – efficient dosage). Verluste durch Versickerung oder Verdunstung werden mit solchen nanoskaligen Werkzeugen minimiert (nanodevice for smart treatment delivery systems). Für weitere nanotechnologische Lösungen vgl. [Grimm 2007].

Nanoskalige
Applikationsmittel
bringen Dünger
punktgenau aus

Informations- und Kommunikationstechnologien

Die informationsgestützte Landwirtschaft ermöglicht eine exakte Flächennutzung und damit eine verbrauchsarme Bewässerung und teilflächenspezifische Bewirtschaftung. Sie führt zu einer ökologischen Entlastung, der Einsparung von Betriebsmitteln und zu einer Reduktion der Gewässerbelastung. Bei einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung (precision farming) werden die zu bearbeitenden Flächen anhand satellitengestützter Fernerkundung meteregenau kartiert und die Daten in einem Geoinformationssystem (GIS) gesammelt. Zusammen mit Informationen über Bodenzusammensetzung, Pflanzenbestände und bisherige Erträge können die Landmaschinen exakt gesteuert und die auszubringenden Stoffe für jede Teilfläche genau berechnet und ausgebracht werden. Die Verwendung GPS-gestützter, automatischer Fahrzeug-Lenksysteme ist möglich und beinhaltet den Einsatz weiterer Sensoren, mechanischer Taster, von Ultraschall und Kamerasystemen.

Exakte
Flächennutzung durch
I&K Technologien

Bio- und Gentechnologien

Genetische Anpassung
von Pflanzen an
extreme Standorte

Veränderung des
Salz- und
Wasserhaushaltes von
Pflanzen sind ein Ziel

Gentechnisch veränderte Pflanzen können an die Gegebenheiten des jeweiligen Standortes spezifisch angepasst werden. An abiotischen (Temperatur, Trockenheit, Salz, etc.) und biotischen Stressresistenzen (Viren, Insekten, Nematoden, pathogene Pilze, etc.) wird ebenso geforscht, wie an einer Veränderung der Inhaltsstoffe (Nährwert, Qualität, Reifungsverzögerung, Industrieenzyme, etc.). Gene, die den Salz- und Wasserhaushalt von Pflanzen steuern, werden seit einigen Jahren intensiv untersucht [Hu 2006]. Einige Reissorten, die in Wasser mit einem Salzgehalt von 2-3 % überleben, sind bekannt. US-Forscher konnten eine Tomatensorte züchten, bei denen sich Salz in den Blättern sammelt, während die Früchte eine weit geringere Salzkonzentration haben. Häufig werden die Gene, die für die gewünschten Eigenschaften bestimmend sind, artenübergreifend eingesetzt. Ein bestimmtes Gen einer Ratte kommt z. B. bei der Suche nach Kälteresistenzen zum Einsatz. Die langfristigen Auswirkungen transgener Pflanzen auf Menschen und Umwelt sind heute noch nicht abschätzbar.

Fixierung von
Stickstoff aus Luft
ein weiteres Ziel

Die Fixierung von Stickstoff aus der Luft stellt ein weiteres Ziel in der Pflanzengenomik dar. Pflanzen benötigen für ihr Wachstum Stickstoff; Landwirtschaftlich intensiv genutzten Flächen wird deshalb stickstoffhaltiger Dünger zugesetzt, was zu belastetem Grundwasser führt sowie Zeit und Geld kostet. Die Untersuchung von Bakterien, die in Symbiose mit Pflanzen in deren Wurzelbereich leben und die Pflanzen mit aus der Luft gebundenem Stickstoff versorgen, ist daher von großem Interesse [Kohring 2001]. Auch die Oxidation von Ammonium aus abgestorbener Pflanzenmasse zu dem für Pflanzen wichtigen Nitrat, ist für die Forscher von Interesse. Es wird z. B. nach Wegen gesucht, die Aktivität der Ammonium-oxidierenden Bakterien zu stimulieren, um die Menge an stickstoffhaltigem Dünger zu begrenzen. Neueren Erkenntnissen zufolge spielen bei der Oxidation des Ammoniums vor allem Archaeobakterien eine zentrale Rolle [Leininger 2006].

Die Genomforschung zielt auch auf die Resistenzbildung von Pflanzen gegen eine Vielzahl von Schädlingen. Insbesondere die Resistenz gegen bakterielle Erreger lässt sich nur schwer mit konventionellen Zuchtmethoden erzeugen, die Genomforschung könnte hier Abhilfe schaffen.

Vermeidung von Nährstoffbelastung

Ökologische
Orientierung von
Viehhaltung und
Ackerbau

Vermeidbare Nährstoffbelastungen der Gewässer aus landwirtschaftlichen Quellen ergeben sich aus der Trennung von viehreichen und vieharmen Regionen. In viehreichen Gebieten fallen erhöhte Mengen an nährstoffhaltiger Gülle an, die gelagert und als Abfall entsorgt werden muss. Regionen mit wenig Viehhaltung und überwiegend Ackerbau werden großflächig mit billigem Mineraldünger behandelt, der in die

Gewässer gelangt und zu einer hohen Belastung mit Stickstoff und Phosphor führen kann. Im Sinne einer ausgeglichenen Ökobilanz wäre die Verwendung von Stickstoff-Überschüssen aus der Viehhaltung im Ackerbau vor Ort sinnvoll. Dies wird nur in wenigen ökologisch orientierten Betrieben praktiziert.

Anbau standortgerechter Pflanzen

Auch der Anbau standortgerechter Pflanzensorten in der Landwirtschaft führt zu einer Belastungsvermeidung und Ressourcenschonung. Der Anbau wasserintensiver Pflanzen in ariden Regionen Jordaniens, Saudi-Arabiens und Kaliforniens oder in Israel bedarf einer steten Bewässerung (vgl. Abbildung 16). Der zu erwartende Nutzen ist sorgfältig gegen die Nachteile abzuwiegen.



Abbildung 16: Getreideanbau in Trockengebieten in Jordanien. (Quelle: Satellitenaufnahme aus Google Earth)

Die standortgerechte Viehhaltung ist ein weiterer Punkt bei einem nachhaltigen Umgang mit Wasser. Klimatisierte Tierfarmen in Extremgebieten, z. B. in der Wüste, können nur unter Aufwand großer technologischer und finanzieller Mittel betrieben werden. Die saudiarabische Firma Al Safi-Danone betreibt seit 1979 die größte Kuhfarm der Welt mit 30.000 Rindern rund 100 km südöstlich der Hauptstadt Riadh (Al-Safi-Farm). Das Klima hier ist überwiegend heiß und trocken. In der Farm werden jährlich 430.000 Liter Milch produziert, die preislich mit importierter Milch mithalten kann. Zur Herstellung von einem Liter Milch werden an diesem Standort 3.500 Liter Wasser benötigt (unter idealen Bedingungen sind es acht Liter). Das Wasser zur Tränkung der Kühe und zur Säuberung der Ställe und Melkanlagen wird aus rund 2.000 m Tiefe aus der Erde geholt, es handelt sich um nicht

Standortgerechte
Viehzucht

regenerierbares fossiles Wasser. Niedrige Energiepreise und Löhne ermöglichen den Luxus der Milchproduktion in der Wüstengegend. Die Produktion kann noch etwa 20 Jahre weitergeführt werden, bis die Wasserreserven aufgebraucht sind.³⁹

3.1.5 Verbrauchsarme Geräte und Sanitärinstallationen

Einen wesentlichen Einfluss auf den Wasserverbrauch hat auch das Verhalten der Verbraucher. Moderne energie- und wassereffiziente Geräte und Sanitäreinrichtungen stehen für den häuslichen und außerhäuslichen Gebrauch zur Verfügung. Gerade bei Neubauvorhaben lohnt sich der Einbau von Wassersparinstallationen.

Wasch- und Geschirrspülmaschinen

Moderne Wasch- und Geschirrspülmaschinen verbrauchen deutlich weniger Wasser

Moderne Waschmaschinen verbrauchen heute zwischen 36 und 45 Liter Wasser während es 1975 noch etwa 150 Liter pro Waschgang waren. In Geschirrspülern ging der Verbrauch von 60 Litern pro Spülgang im Jahr 1965 auf heute etwa 14 Liter zurück [Richter 2005]. Diese Erfolge sind mit innovativen Lösungen aus der Sensortechnologie verbunden. Ein Sensor kann z. B. den Trübungsgrad des Wassers bestimmen und diesen als Grundlage für den Verschmutzungsgrad der Wäsche benutzen. Die Zahl der Spülgänge kann an das Ausmaß der Verschmutzung vollautomatisch und im laufenden Betrieb angepasst werden. Diese Technik wird von den meisten kommerziellen Anbietern von Waschmaschinen verwendet. Fast alle Geräte verfügen außerdem über Wasser- und Energiesparprogramme für gering verschmutztes Geschirr oder Wäsche.

Die Einführung einer Klassifizierung aller Geräte nach ihrer Wassereffizienz analog zu dem EU-Label der Energieeffizienz (von A (niedriger Energieverbrauch) bis G (hoher Energieverbrauch)) wird vorgeschlagen. Der Wassereffizienzindex ist dann definiert als Wasserverbrauch/Spülwirkung.⁴⁰

Einhandhebelmischer und Armaturen

Einhandhebelmischer und Duschorrichtungen mit Thermostaten im Nassbereich

Zweigriffarmaturen für getrennte Kalt- und Warmwasser-Regelung haben einen höheren Wasserverbrauch als Einhandmischer. Häufiges Nachregulieren des Mischwassers bei laufendem Wasserhahn ist hierfür

³⁹ <http://archiv.tagesspiegel.de/archiv/10.05.2002/50286.asp>

⁴⁰ „Neugestaltung der Energieverbrauchskennzeichnung“ Workshop 15.05.2006, dena, Berlin, Abschlussbericht

verantwortlich. Einhandhebelmischer erlauben eine schnelle und konstante Temperaturregelung und finden breite Verwendung.

Sparsam im Verbrauch sind auch Duschorrichtungen mit Thermostaten, die nur die minimal erforderliche Menge an Kaltwasser passieren lassen und die Temperatur gradgenau halten können; Armaturen mit einer Begrenzung der Durchflussleistung basieren auf ähnlichen Prinzipien. Im einfachsten Fall wird ein ringförmiger Metalleinsatz im Wasserhahn befestigt, der den Leitungsquerschnitt reduziert. Berührungslos schaltbare Armaturen in öffentlichen Gebäuden oder Büroanlagen und Selbstschlussarmaturen in Sportstätten sind ebenfalls sparsam im Verbrauch.

Vakuuntoiletten

Vakuuntoiletten benötigen pro Spülung etwa ein Liter Wasser und sind daher bestens für mobile Anwendungen geeignet. Sie werden in Zügen, Flugzeugen, Schiffen und in der Raumfahrt eingesetzt und gewinnen auch bei Sanitäreinrichtungen in Energiesparhäusern an Bedeutung. Moderne Hochgeschwindigkeitszüge wie der ICE, TGV oder der Shinkansen werden nur noch mit Vakuumsystemen betrieben. Vakuuntoiletten entsprechen den hygienischen und technischen Standards und werden im stationären Bereich in größeren Gebäuden mit nur einer Vakuumstation und besonders in Verbindung mit Grauwasseraufbereitungsanlagen (vgl. Kapitel 3.2.3) betrieben.

Vakuuntoiletten finden Verwendung in Zügen und größeren Gebäuden

Wasserspartoiletten

Wasserspartoiletten verbrauchen pro Spülung vier bis sechs Liter für Fäkalien und nur 0,6 Liter für Urin. Es sind zwei verschiedene Bauarten im Handel erhältlich, Spülkästen mit Spülstoppfunktion und Spülkästen mit zwei Tasten. Bei einer anderen Form von wassersparenden Toiletten wird das Spülwasser vor der Spülung zur Händereinigung verwendet; diese finden verbreiteten Einsatz in Japan.

Wasserspartoiletten verbrauchen nur 0,6 l für Urin

Separationstoiletten (NoMix Toilette)

In Separationstoiletten (vgl. Abbildung 17) können Fäkalien und Urin getrennt aufgefangen werden. Das Wegspülen von Fäkalien verbraucht hierbei vier Liter Wasser, für Urin werden 0,4 Liter Wasser benötigt. Es sind mehrere Modelle auf dem Markt; sie werden vor allem in Schweden und Norwegen im Alltag getestet, meist in Verbindung mit einer getrennten Aufarbeitung der Teilströme.

Separationstoiletten trennen Fäkalien und Urin



Abbildung 17: NoMix Toilette. (Quelle: EAWAG)

Unverdünnte
Ableitung von Urin

Urin separierende Vakuumtoiletten

In diesem Fall wird der Urin unverdünnt abgeleitet und das Wegspülen der Fäkalien braucht etwa einen Liter Wasser. Die fast unverdünnten Fäkalien und der Urin können bei den Urin separierenden Toilettenarten durch nachfolgende Behandlung zu hochwertigem Dünger für die Landwirtschaft aufbereitet werden [Wilderer 2001].

Komposttoiletten

Moderne Komposttoiletten trennen Urin und Kot, sind geruchsfrei, benötigen kein Spülwasser und die kompostierten Fäkalien stehen als Dünger zur Verfügung. Obwohl dieser Toilettentyp am ökologischsten arbeitet, stoßen Komposttoiletten auf sehr geringe Akzeptanz in der Bevölkerung und werden daher als nicht zukunftsfähig eingestuft.

Wasserlose Urinale

Wasserlose Urinale
brauchen besondere
Oberflächen-
Materialien

Diese Urinale bestehen aus Keramik, glasfaserverstärktem Kunststoff oder Edelmetall, weisen keine Spülknöpfe auf, zeichnen sich durch eine extrem glatte Oberfläche aus und verbrauchen kein Wasser. Um das Aufsteigen der Kanalgase zu verhindern, gibt es mehrere technische Lösungen. Der Siphon kann mit einem Magnetverschluss und einem Sensor ausgestattet sein oder der Siphon enthält einen hydraulischen Abschluss aus ölhaltiger, auf dem Urin aufschwimmender Substanz [Schmitt 2003].

3.1.6 Trends und aktuelle Projekte

Die Integration von Wasserversorgung und Abwasserbehandlung in Verbindung mit Wasser sparenden Techniken, Kreislaufführung und spezifischer Behandlung von Teilströmen sind Trends auf dem Weg zu einem minimierten Wasserverbrauch. Die Kreislaufführung von Prozesswasser mit und ohne vorheriger Aufreinigung kann zu einer enormen Reduktion des Frischwasserbedarfs von über 90 % führen.

Integration von Wasserver- und -entsorgung in Verbindung mit wassersparenden Techniken

Im industriellen Umfeld finden sich verstärkt prozess- und produktionsintegrierte Maßnahmen in Verbindung mit einer spezifischen Behandlung von Teilströmen. Es ist wirtschaftlich sinnvoll und wegen strengerer gesetzlicher Vorgaben oft auch zwingend erforderlich, das Abwasser am Entstehungsort zu behandeln. Verstärkt werden auch integrierter Umweltschutz und Recycling-Prozesse mit Energie- und Nährstoffrückgewinnung gekoppelt.

Teilstromspezifische Behandlung des Abwassers

Der Ersatz von Wasser höchster Qualität (Trinkwasser) durch Wasser minderer Qualität birgt Potenziale und kann Haushalten und Industrien Einsparungen und eine größere Unabhängigkeit von großen Versorgern sichern.

Ersatz von Wasser in Haushalt und Industrie

Maßnahmen zur Reduzierung des Wasserverbrauchs können zu Problemen in den bestehenden Systemen führen. Die Schwemmkanalisation ist auf hohe Durchflussraten angewiesen, ein verminderter Abwasserdurchfluss kann zu verstärkten Feststoffablagerungen führen; die Lebensdauer der Rohrleitungen kann verkürzt sein, und Geruchsprobleme sind möglich. Neue Technologien beschäftigen sich mit dieser Problematik und analysieren Möglichkeiten, weniger stark ausgelastete Kanalnetze zu bewirtschaften. Eine Verringerung des Trinkwasserverbrauchs hat aus Sicht der Versorger zwingend eine Erhöhung der Wasser- und Abwasserpreise zur Folge, da die hohen Fixkosten der Trinkwasserversorgung (gegebene Kapazitäts- und Sicherheitsreserven) auf immer weniger verkaufte Kubikmeter umgelegt werden müssen [Rudolph 2001].

Reduktion des Wasserverbrauchs führt zu Problemen mit der Kanalisation

In der Landwirtschaft ist die Flächennutzung rückläufig, zu erwartende Ertragssteigerungen basieren auf Optimierungsverfahren der Bewässerung, Düngung und allgemeiner Bewirtschaftung. Informations- und Kommunikationstechnologien, insbesondere in Verbindung mit moderner Sensorik sowie Mess- und Regelungstechnik, nehmen hier eine herausragende Bedeutung ein und setzen Akzente.

Optimierungsverfahren in der Landwirtschaft

Im Folgenden sind einige aktuelle Projekte dargestellt:

- Sensornetze sollen in Indien bei der Wasserreduktion in der landwirtschaftlichen Bewässerung helfen. Verschiedene Parameter wie Bodenfeuchte, Temperatur, Besonnung und Niederschlagsmengen werden von einem zentralen Server

ausgewertet und geben den Bauern Grundlagen für Bewässerungsentscheidungen.⁴¹

- Die Frankfurter Firma Geohumus hat eine Substanz entwickelt, die der Speicherung von Wasser dient und dem Boden im Garten- und Landschaftsbau beigemischt werden kann. Das Material besteht aus Superabsorbent (Polyacrylaten), Silikaten und Gesteinsmehl und könnte den Bewässerungsbedarf um bis zu 50 % senken.⁴²
- Ein Team aus finnischen und kalifornischen Forschern konnte ein Pflanzgen identifizieren, das für den Gasaustausch in Pflanzen verantwortlich ist. Die Wissenschaftler hoffen nun Pflanzen züchten zu können, die eine größere Menge CO₂ aus der Luft aufnehmen und weniger Wasser abgeben und so an trockenen Standorten gedeihen können [Vahisalu 2008].
- Auch chinesische Forscher der Chenyang Senlu Solid Water Company haben eine neue Methode der Wasserspeicherung für die Bewässerung entwickelt: Das Wasser ist dabei in hochmolekularen Polymeren gebunden, wird durch Bodenmikroben gelöst und bewässert so die Pflanzenwurzel. Das „feste Wasser“ kann dazu dienen, Bäume in Trockengebieten zu pflanzen.⁴³
- Umwelt- und Ressourcen schonende biotechnologische Verfahren in Produktion und Dienstleistung hat das BMBF im Rahmen des Förderprogramms „Nachhaltige BioProduktion“ bis 2007 und anschließend in der Initiative BioIndustrie 2021 gefördert. Innovative Ansätze, wie die Modellierung von Stoffwechselwegen, das Enzymdesign, Analysen des Stoffwechselflusses und moderne Methoden der Bioverfahrenstechnik gehören zu dem Themenkreis. Insbesondere die Industriezweige Chemie und Pharma, Lebensmittel und Getränke, Papier und Zellstoff sowie Textil und Leder sind hier angesprochen.⁴⁴
- Den Ersatz von Trinkwasser durch Meerwasser für Toilettenspülungen in neuen Hotels und Wohnsiedlungen sowie zur Kühlung von Kraftwerken und Chemiefabriken will die Stadt Shenzhen in China testen. Die Trinkwasservorkommen in der

⁴¹ <http://www.wasser-wissen.de/abwassernews/2006/juni2006.htm#010606>

⁴² „Ausgezeichnete Geschäftsideen made in Germany“ in VDI Nachrichten Nr. 30 vom 28.7.2006

⁴³ Chenyang Senlu Solid Water Company

⁴⁴ <http://www.bmbf.de/de/1121.php>

Region sind sehr niedrig, Wasserknappheiten sind häufig die Folge.⁴⁵

- Das vom BMBF geförderte Projekt „GABI-FUTUR: Lebensbasis Pflanze – von der Genomanalyse zur Produktinnovation“ (2007-2013) beschäftigt sich unter anderem mit pflanzenbasierten Systemen zur erneuerbaren Energieerzeugung und der Entwicklung stresstoleranter Pflanzen.⁴⁶
- Die Entschlüsselung und Nutzung von Bakterien-Genomen wird vom BMBF im Rahmen des Schwerpunktes „GenoMik Plus – Funktionelle Genomforschung an Mikroorganismen für industrielle Produktion, Ernährung, Umwelt und Gesundheit“ in den Jahren 2006-2009 gefördert.⁴⁷
- Forscher eines internationalen Projektes untersuchen erstmalig das Erbgut eines höheren Einzellers aus der Polarregion. Die Kieselalge lebt bei Temperaturen von -30°C und bei bis zu 4-fachem Salzgehalt, wie er in Meerwasser üblicherweise gefunden wird. Die Forscher erhoffen sich wichtige Aufschlüsse über die Mechanismen der Temperaturtoleranz.⁴⁸
- Siemens hat 300 Kilometer von Brisbane, Australien entfernt das 750 Megawatt Kohlekraftwerk Kogan Creek errichtet. Das Kühlwasser wird in einem vom deutschen Hersteller Gea gebauten Kondensator zurück gewonnen und wieder verwendet. Der Bedarf an Frischwasser konnte so um 90 % reduziert werden.⁴⁹

⁴⁵ <http://www.netzeitung.de/vermishtes/396248.html>

⁴⁶ <http://www.fz-juelich.de/ptj/gabi-future>

⁴⁷ <http://www.genomik-plus.de/>

⁴⁸ <http://idw-online.de/pages/de/news171276>

⁴⁹ <http://www.wiwo.de/technik/der-markt-fuer-wasseraufbereitung-boomt-301782/>

3.2 Maximierung der Verfügbarkeit

Regeneration der
Wasserreserven
essenziell

Neben der Minimierung des Wasserverbrauchs ist die Maximierung der Wasserverfügbarkeit wesentliches Element eines sinnvollen Umgangs mit Wasser. Nur wenn rechtzeitig und nachhaltig die Regeneration der Wasserreserven und der Erhalt des Wasserkreislaufs gesichert werden, kann dauerhaft Wasser entnommen werden. Die umsichtige Planung von Großprojekten, der Gewässerschutz und ein funktionierender Klimaschutz sind Kerngedanken dieses Problemfeldes. Auch die Wieder- oder Weiterverwendung von Wasser im Rahmen von Recycling-Konzepten dient der Maximierung von Wasserverfügbarkeit.

3.2.1 Gewässerschutz, Staudämme, Klimaschutz

Gewässerschutz umfasst die Gesamtheit an Maßnahmen, um eine Verunreinigung der Gewässer zu vermeiden und die natürliche Selbstreinigung zu erhalten. Herausforderungen sind nutzungsbedingte Beeinträchtigungen der Gewässerstruktur (z. B. durch die Schifffahrt), diffuse Nährstoffeinträge, Verschmutzung, Verbauung, Übernutzung und andere negative Modifikationen.

Renaturierung von
Flüssen ein teures
Unterfangen

Flüsse können mit relativ hohem technologischen und finanziellen Aufwand renaturiert werden. Die Wiederherstellung von natürlichen Gewässerstrukturen, z. B. von Auengebieten als natürlicher Überflutungspuffer wird zunehmend in Betracht gezogen, da die Folgeschäden und -kosten der ursprünglichen Eingriffe, wie z. B. Flussbegradigungen, so enorm sind. Beispiele sind Bemühungen um verschiedene, stark belastete Wassersysteme, wie die Everglades in den USA (30 Jahre geplant, 7,8 Milliarden US-\$ veranschlagt), der Fluss Murray-Darling in Australien (Bemühungen seit 1991, über eine Milliarde US-\$) oder der Rhein in Europa (20 Jahre bisher, Gesamtsumme unbekannt, geschätzte 16,6 Milliarden US-\$ in 6-Jahres Perioden) [WWF 2006].

Kritische Abwägung
von
Großbauprojekten

Zukünftige Lösungsansätze beinhalten eine sorgfältigere Abwägung der Vor- und Nachteile von Großbauprojekten und irreversiblen strukturellen Eingriffen, wie der Abtrennung von Auengebieten, dem Trockenlegen von Feuchtgebieten, der Kanalisierung von Flüssen oder großer Bewässerungsprojekte in ariden Regionen. Besonders der Bau von Staudämmen ist wegen negativer Folgen genauestens zu überdenken; ökologische Auswirkungen sollten berücksichtigt werden. Ein von der Weltkommission für Staudämme (World Commission on Dams) beauftragtes Expertengremium hat die Wirksamkeit von Großstaudämmen und Alternativen für die Nutzung von Wasserressourcen untersucht sowie Kriterien und Richtlinien für die Planung und den Betrieb solcher Projekte entworfen. Die Experten kommen zu der Überzeugung, dass Großstaudämme für

Bewässerungszwecke und für die kommunale und industrielle Wasserversorgung nur selten ihr Planziel erreichen. Nachfrage-orientierte Ansätze, ein effizienteres Management sowie eine optimierte Nutzung der bestehenden Ressourcen und Infrastruktur und viele andere Optionen sind häufig zielführender [WCD 2000]. Von einer großflächigen Umsetzung dieser Empfehlung sind die meisten Nationen weit entfernt [WWF 2005].

3.2.2 Anreicherung und Reinigung von Grundwasser

Allgemein dient die Einleitung, Verrieselung oder Versickerung von Fluss-, Oberflächen- oder gereinigtem Abwasser der **Anreicherung von Grundwasser** und damit mittelbar der Sicherung von Wasserkreisläufen. Das versickernde Wasser wird durch die Bodenschichten und den darin lebenden Mikroorganismen auf natürliche Weise gereinigt und kann nach einer Verweildauer wieder entnommen werden. Die Verweildauer im Boden hängt von der Art der Einbringung ab, versickertes Wasser kann teils nach sechs Monaten wieder entnommen werden, direkt in das Aquifer injiziertes Wasser erst nach zwölf Monaten [Radcliffe 2003]. Angereichertes Grundwasser wird vor einem etwaigen Gebrauch als Trinkwasser aufgereinigt und desinfiziert. Dieses Vorgehen stößt in den USA jedoch auf Bedenken in der Bevölkerung [Okun 2000].

Anreicherung von Grundwasser z. B. durch Versickerung

Wenn die Qualität des existierenden Grundwassers verbessert werden soll, kann das zu versickernde Wasser nach einer normalen Klärung auch mittels Umkehrosmose, Mikrofiltration und Chlorung oder UV-Strahlung gereinigt werden. Die Qualität des gereinigten, zu versickernden Wassers übersteigt die von Trinkwasser dann sogar meist deutlich.

Zu versickerndes Wasser kann auch zuvor gereinigt werden

Die Anreicherung von Grundwasser und das damit verbundene Anheben oder Stabilisieren des Grundwasserspiegels stellt in Trockengebieten eine wichtige Option dar, die Trinkwasserversorgung sicher zu stellen und das Eindringen von Salzwasser in Trinkwasseraquifere zu verhindern. Die Water Factory 21 in Orange County, Kalifornien, versickert seit 1976 recyceltes Abwasser im Untergrund. Schon im Jahr 1956 war der Grundwasserspiegel wegen starker Wasserentnahmen aus dem Aquifer so stark gesunken, dass Meerwasser eindrang. Das zu versickernde Wasser wird in diesem Projekt mit einer Umkehrosmose filtriert und anschließend desinfiziert.

Neben der Water Factory 21 beschäftigen sich noch andere US-amerikanische Projekte mit der Abwasseraufbereitung und Grundwasseranreicherung, wie in El Paso, Texas oder in Südkalifornien (Montebello Forebay Groundwater Recharge Projekt). Bei letzterem handelt es sich um eines der größten Projekte zur indirekten Einspeisung von gereinigtem Abwasser in ein Trinkwasseraquifer durch Versickerung

Verschiedene US-Projekte zur Grundwasseranreicherung

Gezielte Versickerung
in deutschen
Ballungsräumen

(200.000 m³ Wasser/Tag). Recyceltes Abwasser kann auch zur Nachspeisung von Stauseen verwendet werden, wie in Occoquan, Virginia [Wilderer 2001].

In Deutschland wird in stark bebauten Gebieten Regenwasser gezielt versickert, um das Niederschlagswasser am Entstehungsort in den natürlichen Wasserkreislauf zurückzuführen und die Grundwasserreserven zu regenerieren. In städtischen Gebieten entsteht leicht das Problem, dass Regenwasser in die Kanalisation abgeleitet wird und der Grundwasserneubildung an Ort und Stelle nicht zur Verfügung steht. Zu den gängigen Techniken gehören die Flächenversickerung, die Muldenversickerung, die Mulden-Rigolen-Versickerung und die Schachtversickerung. Abbildung 18 und Abbildung 19 stellen ein Mulden-Rigolen-System schematisch und anhand eines realen Beispiels dar.



Abbildung 18: Mulden-Rigolen-System zur Versickerung von Grundwasser in einem Wohngebiet; schematische Darstellung. (Quelle: Stadt Münster, Tiefbauamt)



Abbildung 19: Reales Beispiel eines Versickerungs-Systems. (Quelle: [UBA 2005])

Einige deutsche Städte sind um die Regenwassernutzung und -versickerung sehr bemüht und bieten finanzielle Anreize, wie die Stadt Bonn, die Dachbegrünung, Flächenentsiegelung und Versickerungsanlagen, die den Ablauf von Regenwasser in die Kanalisation vermindern, fördert.

Die gezielte **Grundwassersanierung** (ground water remediation) kann *ex-situ* oder *in-situ* erfolgen. Im ersten Fall muss das kontaminierte Grundwasser an die Oberfläche gepumpt werden, um in einer entsprechenden Einrichtung gereinigt zu werden. Zur Reinigung eignen sich so gut wie alle physikalisch-chemischen oder biologischen Verfahren zur Abwasserbehandlung (vgl. S. 69) oder der Trinkwasseraufbereitung (vgl. S. 78). Neben den gängigen Verfahren sind die so genannten SAMMS (self-assembled monolayers on mesoporous supports) in der Erprobung [Tratnyek 2006]. Eine Einzelschicht von Molekülen lagert sich hierbei an die funktionalisierte Oberfläche von mesoporösem Material an. Die Oberflächeneigenschaften ermöglichen eine Adsorption von Schwermetallen und Anionen.⁵⁰ Sehr viel versprechend in der *ex-situ* Reinigung sind auch Nanopartikel, wie nanoskalige Katalysatoren, Dendrimere, die Photooxidation mit Titandioxid oder mit nanoskaligen Halbleitern.

Verunreinigtes Grundwasser kann *ex-* oder *in-situ* saniert werden

Bei der *in-situ* Grundwassersanierung muss das Wasser nicht an die Oberfläche gepumpt werden, was enorme Vorteile mit sich bringt. Einige Verfahren stehen hierfür zur Verfügung, dazu gehört die Anreicherung mit Sauerstoff durch das Einblasen von Luft (air sparging), eine Mischung aus Belüftung und Absaugung (bioslurping), die Eindüsung von Pressluft (hydrofracturing) aber auch biologische Verfahren der Sauerstoffanreicherung (bioventing, enhanced bioremediation, phytoremediation) und die Verwendung chemischer Substanzen zur Oxidation (für einen umfassenderen Überblick über die verschiedenen Techniken der *in-situ* und *ex-situ* Grundwassersanierung vergleiche Federal Remediation Technologies⁵¹).

Verschiedene Verfahren zur *in-situ* Grundwassersanierung

Auch in der *in-situ* Grundwassersanierung haben Nanotechnologien Einzug gehalten. Nanokatalysatoren können direkt in das zu reinigende Wasser dispers gelöst oder immobilisiert auf einer Membran mit dem Wasser in Kontakt gebracht werden. Es ist auch möglich, die Partikel in einer reaktiven „Wand“ im Boden einzubringen, durch die verunreinigtes Wasser fließt und gereinigt wieder austritt.

Nanotechnologien haben großes Potenzial in beiden Bereichen

Viel versprechend ist auch der Einsatz von nullwertigen Eisen-Nanopartikeln (nanoscale zero-valent Iron, Fe(0), NZVI) zur Oxidation von Organophosphorverbindungen (Nervengifte wie Phosgen). Auch eine Eliminierung von Nitraten, Cr(VI)-, Pb(II)-Verbindungen sowie

⁵⁰ http://samms.pnl.gov/tech_descrip.stm

⁵¹ <http://www.frtr.gov/matrix2/section1/toc.html#Sec4>

schwefelhaltigen Triazinen und Perchloraten mit nanoskaligem, nullwertigen Eisen wird beforscht. Nitrate sind mit den meisten Reinigungsverfahren nicht zu beseitigen, finden sich aber in immer größeren Mengen im Grundwasser [Dowall 2005]. Nullwertiges Eisen wird auch zusammen mit anderen Substanzen wie Wasserstoffperoxid (Fenton's Reagenz), Ozon und Sauerstoff sowie in Verbindung mit Ultraschall verwendet. Während nullwertige Eisenpartikel im Mikrometermaßstab schon seit längerem im Einsatz sind, befinden sich nanoskalige Partikel noch in der Test- und Entwicklungsphase. Über zehn verschiedene Produkte mit nanoskaligem Fe(0) sind bereits auf dem Markt erhältlich, die Kosten liegen zwischen 40 und etwa 150 US-\$ pro Kilogramm, je nachdem, ob die Eisenpartikel noch mit Palladium beschichtet werden [GDNP 2006].

3.2.3 Grauwasserrecycling

Grauwasser kann zur Bewässerung, zur Reinigung und für die Toilettenspülung genutzt werden

Als Grauwasser wird der Abfluss von Bade- und Duschanne, ggf. auch von Waschtisch und Waschmaschine bezeichnet. Das Sanitärabwasser der Toiletten wird als Schwarzwasser (Urin, Spülwasser und fäkale Feststoffe) bezeichnet. Grauwasser ist fäkalienfrei, von geringer Verschmutzung und fällt regelmäßig an, große Speichereinrichtungen für Belastungsspitzen und Trockenzeiten sind nicht nötig. Gereinigtes Grauwasser kann für die Bewässerung, zu Reinigungszwecken und für die Toilettenspülung eingesetzt werden. Grauwasserrecycling-Anlagen werden von mehreren Firmen angeboten; Abbildung 20 zeigt eine exemplarische Hausanlage. Ausgereifte und bewährte Klärtechniken sind Tautropfkörper und bei ausreichendem Platzangebot vertikal beschickte Bodenfilter (Pflanzenkläranlagen). Das Membranbelebungsverfahren und die elektrolytische Reinigung sind in Europa noch wenig erprobt.

Grauwasseranlagen finden sich in öffentlichen Einrichtungen

Anlagen zur Grauwasserreinigung finden in Deutschland und anderen Ländern Verbreitung als dezentrale Systeme in öffentlichen Einrichtungen (Schulen, Verwaltungsgebäude, Universitätsgebäude, Sportanlagen), aber auch in privaten Einrichtungen wie Hotels, Flughäfen und Bürogebäuden. Anlagen für größere Komplexe, insbesondere in Verbindung mit modernen Membrantechnologien, sind in der Erprobung. Im Millennium Dome in London werden Grau-, Regen- und Grundwasser für Toilettenspülung und Urinale aufbereitet [Rudolph 2001].

Bisherige Erfahrungen mit Grauwasseranlagen uneinheitlich

Die bisherigen Erfahrungen mit Grauwasseranlagen sind uneinheitlich. Bei Pilotprojekten mit Kleinstanlagen wie z. B. bei der kanadischen Conservation Co-Op [CMHC 2002] wird häufig die nicht konstante Reinigungsleistung als Folge technischer Störungen, schlechter oder zu komplexer Bedienbarkeit bemängelt. Gründe hierfür sind fehlendes Fachwissen und Kompetenz der privaten Betreiber zur Wartung der

Pumpen und anderer Anlagenteile sowie zu hoher personeller Aufwand. Es kann zu Teilausfällen, technischen Störungen und in Folge dessen zu ungenügender Reinigungsleistung kommen. Weiterer Forschungs- und Innovationsbedarf wird von technologischer Seite gesehen, um wartungsfreie, bedienfreundliche Geräte einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen.

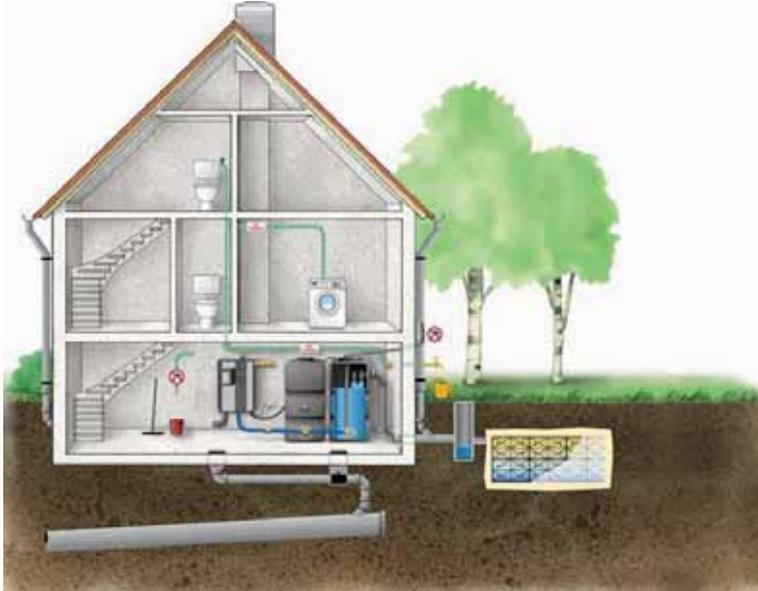


Abbildung 20: Exemplarische Grauwasseraufbereitungsanlage. (Quelle: GEP-Umwelttechnik GmbH)

Der Betrieb und die Wartung von Kleinstkläranlagen im häuslichen Umfeld stellen hohe Anforderungen an den privaten Nutzer; technische Störungen und Fehler im Betriebsablauf sind keine Seltenheit. Eine **Automatisierung und ferngesteuerte Überwachung** über eine zentrale Warte könnte den privaten Betreiber fachlich entlasten sowie einen reibungsloseren Betriebsablauf und eine gleich bleibende Reinigungsleistung ermöglichen [Wilderer 2001]. Es wird an dieser Stelle noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf in der Sensorik und zentralen Überwachung von dezentralen Hauskläranlagen gesehen.

Auch über die **Wirtschaftlichkeit** der dezentralen Aufbereitung von Grauwasser herrscht bis heute kein Konsens. Zwar verringert die Aufbereitung von Grauwasser den Trinkwasserbedarf und die Menge entstehenden Abwassers deutlich, doch die Anschaffungskosten (die Anlage selbst, ein zweites Netz für Grauwasserableitung und die Betriebswasserzuleitung) und die Wartung sind teuer. Bei Neubauten ist der Aufwand für das doppelte Leitungsnetz geringer und die Wirtschaftlichkeit eher gegeben [Wilderer 2001] als bei Altbauten, in denen nachgerüstet werden muss. Verschiedene Studien kommen zu der

Kleinstkläranlagen
für den
Privatgebrauch
störungsanfällig

Dezentrale
Aufbereitung nicht
unbedingt
wirtschaftlich

Auffassung, dass Grauwasserrecyclinganlagen für einzelne Haushalte unwirtschaftlich sind, sich jedoch bei größeren Gebäuden oder Gebäudekomplexen rentieren können [Schmitt 2003].

3.2.4 Abwasserrecycling

Recyceltes Abwasser
zur weiteren
Benutzung - u. a.
Japan ist führend

Beim Abwasserrecycling wird das Abwasser als Ganzes gereinigt und das recycelte Abwasser für die Bewässerung, Reinigung oder die Toilettenspülung wieder verwendet. Verbreitete Verfahren zum Abwasserrecycling sind das Belebtschlammverfahren, Membrantechnologien, Membranbioreaktoren und je nach Platzangebot auch Feuchtgebiete. In ariden Gebieten ist die „Wasserwiederverwendung“ ein probates Mittel, Wasserknappheiten zu begrenzen. Besonders Japan und die USA sind in der Abwasseraufreinigung als führend zu bezeichnen [Radcliffe 2003]. In Japan erhalten Gebäude mit einer Nutzfläche von mehr als 10.000 m³ seit 1984 keine Baugenehmigung mehr, wenn nicht das Recycling von Abwasser und die Wiederverwendung vorgesehen ist. Der Shinjuku Komplex in Tokio beherbergt beispielsweise 19 Hochhäuser, deren Toilettenspülung mit recyceltem Abwasser betrieben werden.

USA: recyceltes
Abwasser nur für die
Bewässerung und zur
Kühlung von
Kraftwerken

In den USA wird recyceltes Abwasser (reclaimed wastewater) fast ausschließlich für die Bewässerung in der Landwirtschaft, öffentliche Grünanlagen, als Kühlwasser in der Industrie oder in der Brandbekämpfung verwendet. Beispiele für eine weitergehende Versorgung mit recyceltem Abwasser, z. B. für Waschmaschinen oder Toilettenspülung, gibt es in den USA selten, da in der Bevölkerung Akzeptanzprobleme gegen aufbereitetes Abwasser bestehen. Die Mehrheit der Bevölkerung möchte damit nicht in Berührung kommen. Besonders in den trockenen Regionen der USA ist die Abwasseraufbereitung attraktiv, der Verbrauch von gereinigtem Abwasser hat sich in Kalifornien zwischen 1970 und 2002 mehr als verdoppelt [Radcliffe 2003], in Florida ist eine Steigerung um 300 % zu verzeichnen (1986 bis 2004) [Koopman 2006]. Mindestens 13 groß angelegte kommunale Abwasserrecycling-Projekte werden in den USA betrieben, wie z. B. das Green Acres Projekt, der Irvine Ranch Water District und das Monterey County Water Recycling Projekt. In den USA werden seit 1962 erfolgreich Wasseraufbereitungsanlagen (Satellite Water reclamation facilities) in kommunale Kläranlagen integriert, um lange Transportwege des recycelten und zu recycelnden Wassers zu minimieren.

Andere Teile der
Welt noch
rückständig

Das Abwasserrecycling in anderen Teilen der Welt ist noch nicht so weit fortgeschritten. In Ross Hill, Sydney, Australien, wird gereinigtes Abwasser für Bewässerung und Toilettenspülung für etwa 300.000 Menschen verwendet. In einem Pilotprojekt in Singapur wurde zwei Jahre lang das Abwasserrecycling erfolgreich erprobt (2000-2002) und

im Anschluss daran drei Anlagen in Betrieb genommen. Das gereinigte Abwasser wird mittels Mikrofiltration, Umkehrosmose und UV-Bestrahlung behandelt und entspricht dann allen Standards, die an Trinkwasser gestellt werden. Auch in Israel wird aufbereitetes Abwasser zur Bewässerung in der Landwirtschaft eingesetzt. Die Regierung fördert diesen Trend, indem sie landwirtschaftlichen Betrieben, die mit aufgereinigten Abwässern arbeiten, in Dürre Jahren einen höheren Anteil an Wasser zukommen lässt, als den restlichen Betrieben.⁵²

3.2.5 Alternative Wassersysteme

Die Wassersysteme sind in Deutschland und vielen anderen Ländern zentral ausgerichtet. Diese Systeme zeichnen sich durch hohe Sicherheit, großen Nutzungskomfort, geringen Betriebsaufwand und einen hohen Anschlussgrad zumindest in den Ballungsräumen aus. Sie sind jedoch auch gekennzeichnet von Spültoiletten, Schwemmkanalisation und großen Mengen an Wasser als Transportmedium. In der Kanalisation kommt es im Allgemeinen zur Vermischung von Abwasserströmen aus Haushalt und Industrie sowie mancherorts auch Regenwasser. Das stark verdünnte Mischabwasser muss in Kläranlagen aufwändig gereinigt werden, Klärschlamm, der mit zahlreichen problematischen Substanzen belastet sein kann, bleibt zurück. Eine Wiederverwendung von Wert- und Rohstoffen aus recyceltem Abwasser jeglicher Qualität ist eher die Ausnahme. Steigende Kosten und eine stetige Alterung der Systeme in Verbindung mit hohen Investitionskosten sowie technologische Fortschritte machen neue, alternative Wassersysteme attraktiv.

Zentrale
Wassersysteme in
Deutschland und
anderen Ländern

Zwei Grundideen sind hierbei die **Dezentralisierung der Systeme** und die **Trennung von Teilströmen** in der Ver- und Entsorgung. Die einzelnen Teilströme können optimalerweise am Entstehungsort entsprechend ihrer Schadstofffracht durch angepasste Technologien bearbeitet werden.

Dezentrale Systeme
und Trennung von
Teilströmen als
Alternative

Alternative Wassersysteme sind abhängig von den spezifischen Gegebenheiten, der Einwohnerdichte und der geografischen Lage und müssen entsprechend angepasst werden. Gefragt sind flexible Technologien. Dicht besiedelte Ballungsräume in sehr armen Gegenden, in denen eine Trinkwasserversorgung heute mit Flaschen und Kanistern (Mexiko-Stadt, Versorgung über Kanister mit 5 Gallonen Wasser) praktiziert wird, bedürfen einer anderen Lösung, als weniger dicht besiedelte Gebiete armer Regionen (Zapfstellenversorgung in Außenbezirken von Kalkutta) oder industrialisierte Regionen.

⁵² <http://www.anti-defamation.ch/index.php?id=15§ion=2>

Dezentrale Anlagen zur Wasserversorgung und -aufbereitung

Die großflächige Kanalisation nach dem Muster der Industrienationen ist keine allgemein anwendbare Lösung für die Wasserver- und -entsorgung. Dezentrale oder semizentrale Wassersysteme sind durch autarke oder semiautarke Wasserver- und -entsorgungsstrukturen gekennzeichnet. Dadurch entfallen lange Transportwege. Wasserströme werden getrennt gesammelt und bearbeitet. Dezentrale Systeme bieten einen Anreiz zum Wassersparen, denn sie funktionieren auch bei geringem Verbrauch sehr gut.

Dezentrale Systeme werden auf Schiffen und Zügen eingesetzt

Kompakte dezentrale Kläranlagen werden auf Schiffen (z. B. der Gorch Fock), U-Booten (z. B. der Meersburg), in Zügen und zunehmend auch an Land für kleinere Ortschaften eingesetzt, deren Anschluss an eine zentrale Anlage zu teuer wäre. Der 60 Einwohner zählende Ort Heidelberg Neurott, der nicht ans öffentliche Kanalisationsnetz angeschlossen ist, hat im Jahr 2005 eine eigene Membrankläranlage erhalten.⁵³ Auch in Privathäusern finden sich zunehmend Kleinstkläranlagen. In Japan sind Hauskläranlagen weit verbreitet.

Dezentrale Abwasserbehandlungsanlagen sind besonders in den Entwicklungsländern von Vorteil. Als DEWATS (**D**ecentralised **W**astewater **T**reatment **S**ystems) werden Systeme bezeichnet, die für dezentrale Anwendungen in den Entwicklungsländern geeignet sind. Beispiele sind Faulgruben, Emscherbrunnen, anaerobe Filter, Reaktoren in Kaskadenbauweise, horizontale Kiesfilter, anaerobe Becken und Teiche [Wilderer 2001].

3.2.6 Trends und aktuelle Projekte

Dezentrale Einheiten können flexibel eingesetzt werden

Großtechnische und Flächen deckende Systeme werden zugunsten verbrauchernaher und anpassungsfähiger Siedlungstechnik zurückgedrängt. Dezentrale, flexible Einheiten stellen die Verbindung zwischen den Bereichen der Ver- und Entsorgung mit Wasser, aber auch Energie her. Synergien in den Bereichen Abfall und Energie werden durch die ganzheitliche Herangehensweise gebildet. Der allgemeine und branchenübergreifende Trend geht zu einer unabhängigen Wasserversorgung mittels dezentraler oder semidezentraler Systeme sowie Recyclingverfahren.

- In einem Verbundprojekt fördert das BMBF die Erforschung der Anpassbarkeit deutscher Technologien im Wassersektor für Problemstellungen im Ausland. Das aus zwei Teilen bestehende Projekt beschäftigt sich mit der Trinkwassergewinnung sowie der Abwasserbehandlung und Wasserwiederverwendung im Ausland.

⁵³ http://www.igb.fraunhofer.de/www/presse/Jahr/2005/dt/PI_HD-Neurott.html

Ergebnisse beider Teile können beim Technologiezentrum Wasser (TZW) bestellt werden.⁵⁴

- Das EU-Projekt ReclaimWater (2005-2008) unter Federführung der RWTH Aachen beschäftigt sich mit Technologien zur Wasserwiederverwendung für die Grundwasseranreicherung (Water reclamation technologies for safe artificial groundwater Recharge) [BFG 2005].
- Das integrierte EU-Projekt TECHNEAU (Technology enabled universal access to safe water) beschäftigt sich mit allen Aspekten der weltweiten Trinkwasserversorgung, entwickelt neue Technologien und Systeme. 30 internationale Partner arbeiten fächerübergreifend in diesem Projekt mit einer Laufzeit von 5 Jahren (2006-2011) zusammen.⁵⁵
- Die IFAT 2008 (15. Internationale Fachmesse für Wasser-Abwasser-Abfall-Recycling) stellt neue Technologien und Strategien im Wassersektor vor und wird von einem internationalen Fachpublikum sowie voraussichtlich über 2.200 Ausstellern besucht.⁵⁶
- Die World Water Week 2008 (17.-23.8) in Stockholm bietet Workshops, Seminare und Plenar Sessions rund um das Thema Wasser. Voraussichtlich über 1.500 internationale Teilnehmer aus der Wirtschaft, staatlichen Kreisen, Wissenschaft und internationalen Organisationen werden über Entwicklungen und Fortschritte in der Wasserversorgung und -entsorgung diskutieren.⁵⁷
- Das BMBF fördert im Projekt Deus 21 dezentrale Lösungen zur Wasserver- und -entsorgung. So sollen beispielsweise Dörfer, die nicht an zentrale Netze angeschlossen sind mit sauberem Wasser versorgt werden.⁵⁸
- Verschiedene Anbieter, darunter Siemens oder der Wasserspezialist Hans Huber, bieten bereits kostengünstige und mobile Trinkwasseraufbereitungsanlagen für den Einsatz in Entwicklungsländern an. Meist wird das verschmutzte Wasser durch feinste Filter gepresst oder verdampft und kondensiert, um derart Pathogene und Schmutzpartikel zurückzuhalten.⁵⁹

⁵⁴ <http://www.tzw.de/>

⁵⁵ <http://www.techneau.org/>

⁵⁶ <http://www.ifat.de>

⁵⁷ <http://www.worldwaterweek.org>

⁵⁸ <http://deus21.de/>

⁵⁹ <http://www.wiwo.de/technik/der-markt-fuer-wasseraufbereitung-boomt-301782/4/>

3.3 Technologien zur Wasseraufbereitung und Wassergewinnung

Der Kreislauf wird geschlossen durch die Reinigung des Abwassers und die Rückgewinnung und Wiederverwendung von Wert- und Nährstoffen (Wasserreinigung und -gewinnung). Grundsätzlich ist jedoch der Einsatz eines „nachgeschalteten“ Reinigungsverfahrens zur Klärung von Abwasser nur dann sinnvoll, wenn sich die Schadstoffbelastung im Herstellungsverfahren oder am Ort des Abwasserteilstroms nicht wirtschaftlich günstiger vermeiden lässt. Im Folgenden werden technologische Möglichkeiten der Abwasserbehandlung und Wasseraufbereitung vorgestellt.

Nachgeschaltete
Reinigungsverfahren
als letzte Möglichkeit

3.3.1 Abwasserbehandlung

In Deutschland werden fast alle anfallenden kommunalen und industriellen Abwässer in Kläranlagen gereinigt und den natürlichen Wasserressourcen wieder zugeführt. Eine Vielzahl unterschiedlicher Kläranlagentypen ist realisierbar. Im Folgenden wird exemplarisch eine Belebtschlamm-Kläranlage mit Vorklärbecken dargestellt, die zu den häufigsten zentralen Systemen gehört (vgl. Abbildung 21). Die Reinigung beginnt mit der mechanischen Abtrennung (erste Reinigungsstufe) von Feststoffen und der Sedimentation von groben, absetzbaren Verunreinigungen im Sandfang. Je nach Art der späteren biologischen Behandlung kann es sinnvoll sein, die Partikelfracht in einer Vorklärung zu reduzieren [Pinnekamp 2003]. Im Vorklärbecken setzen sich bis zu 30 % der organischen Stoffe am Boden als Schlamm ab, der einer getrennten Weiterbehandlung zugeführt wird; es kann auch eine Fällung der Partikel vorgenommen oder Grobfilter eingeführt werden.

Klärung von
Abwasser und
Rückführung in die
Oberflächengewässer

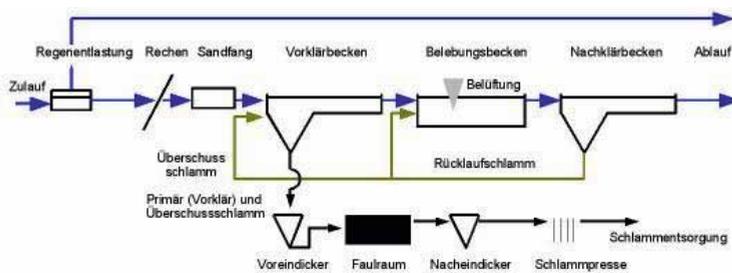


Abbildung 21: Beispielhaftes Fließschema einer Abwasserreinigungsanlage nach dem Belebungsverfahren. (Quelle: Wikipedia)

Im Belebungsbecken werden organische Schadstoffe durch Bakterien im so genannten Belebtschlamm aerob verdaut (zweite Reinigungsstufe). Im Anschluss daran können eine chemische Behandlung zur Beseitigung anorganischer Stoffe und auch eine weitergehende

Belebungsbecken:
Aerober Verdau
durch Bakterien

Kombination von
Energiegewinnung und
Abwasserreinigung

Trinkwasseraufbereitung (dritte Reinigungsstufe) erfolgen. Nach einer Verweildauer im Nachklärbecken wird das Wasser in ein als Vorfluter dienendes Gewässer eingeleitet. Eine Wiederverwendung des geklärten Wassers als Trinkwasser kann nur indirekt über die Aufbereitung von Uferfiltrat erfolgen. Der Klärschlamm kann in einem Faultrum unter anaeroben Bedingungen zu Faulschlamm und Methan zur Energiegewinnung in Biogas-Anlagen abgebaut werden. Wahlweise besteht auch die Möglichkeit, ihn zu verbrennen oder zur Düngung in der Landwirtschaft einzusetzen. Diese Anwendungsmöglichkeit wird kontrovers diskutiert; seit Anfang 2005 darf in Deutschland unverbrannter Klärschlamm nicht mehr ausgebracht werden. Neuere Verfahren zur Klärschlammbehandlung beinhalten die Verwendung von Ultraschall. Durch niederfrequente Ultraschallbehandlung werden wegen auftretender Kavitation hydromechanische Kräfte erzeugt, die zum Zellaufschluss führen und die Struktur des Klärschlammes gezielt verändern können, was zu einem günstigeren Sedimentationsverhalten führt. Für die direkte Behandlung des Abwassers mit Ultraschall zum Abbau von Schadstoffen (Kavitation und sonochemische Effekte) ist ein sehr hoher Energieaufwand wegen der großen Wassermengen nötig. Im *scale-up* zum industriellen Großprozess ist daher das Kosten-Nutzen-Verhältnis noch nicht optimal [Düx 2000]. Die Abwasserbehandlung mit Ozon kann die Menge an anfallendem Klärschlamm reduzieren und seine Sedimentationseigenschaften günstig beeinflussen [Umwelt Magazin 2006].

Spezielle Vor-
Reinigung kann
erforderlich sein

Die Behandlung industrieller Abwässer erfordert je nach Belastungsgrad und Schadstoffart eine vorherige Reinigung, meist durch spezielle Verfahren, z. B. zur Abtrennung von Schwermetallen (u. a. aus Keramikbetrieben und Töpfereien) oder der Behandlung von Prozessabwässern aus Synthesen. Für einige detaillierte Verfahren vergleiche [BREF 2005a].

Relativ neues
Verfahren:
Rieselstrom-
Bioreaktor

Eine relativ neue Entwicklung einer biologischen Reinigungsstufe ist der Rieselstrom-Bioreaktor. Mikroorganismen siedeln auf der porösen Oberfläche von feinkörnigem Trägermaterial, das in einem Reaktorturm aufgeschüttet ist. Durch diese sehr luftige Anordnung muss die für den biologischen Verdau notwendige Menge an Sauerstoff nicht wie bei herkömmlichen Verfahren mit Druck eingeblasen werden, sondern ein Ventilator an der Unterseite des Turms sorgt für die Durchlüftung. Die zu reinigende Lösung rieselt von oben durch den Reaktor und wird auf dem Weg nach unten von dieser „biologischen Membran“ gereinigt. In regelmäßigen Abständen wird die überschüssige Biomasse abgewaschen, entstehender Bioschlamm sedimentiert und die mikrobielle Population verjüngt (regeneriert). Mittlerweile werden etwa 15 Rieselstrom Anlagen in Deutschland, Tschechien, Schweiz, Griechenland und auf den niederländischen Antillen eingesetzt [Ilgen 2006].

3.3.2 Technische Methoden in der Abwasserbehandlung

Die in der Abwasserbehandlung eingesetzten Verfahren lassen sich grob in drei Kategorien unterteilen, die je nach Anforderung kombiniert werden und auch der Rückgewinnung von Wertstoffen dienen können. Eine detaillierte Beschreibung jedes Verfahrens mit dem bestmöglichen Stand der Technik ist in [BVT 2003b] zu finden.

- **Physikalische Trenn-Methoden:** Rechen und Siebe, Öl-/Wasserabscheidung, Zyklon, Sedimentation, Separation, Filtration, Flotation, Ultraschall-Behandlung (Kavitation).
- **Physikalisch-Chemische Methoden:** Fällung, Flockung, Kristallisation, Hydrolyse, chemische Reduktion (mit den Reagenzien: Schwefeldioxid, Natriumhydrogensulfid/metabisulfid, Eisen(II)sulfat, Natriumsulfid und Natriumhydrogensulfid, Harnstoff oder Amidosulfonsäure), chemische Oxidation (mit den Reagenzien: Formalin, H_2O_2 , Br_2 , I_2 , O_3 , verschiedene Chlorverbindungen, Fentons Reagenz), auch in Verbindung mit einer UV-Bestrahlung, Ultraschall, Nassoxidation (unter hohem Druck und hoher Temperatur), Oxidation mit überkritischem Wasser, Oxidation mit H_2O_2 an TiO_2 (Photokatalyse), Neutralisation, Koagulation, Adsorption, Ionenaustausch, Extraktion, Destillation/Rektifikation, Eindampfung, Strippen, Abwasserverbrennung.
- **Biologische Behandlungsverfahren:** Aerober Abbau im Belebtschlammverfahren, im Membranbioreaktor, im Tropf- oder Tauchköperverfahren, im Fest- und Fließbettverfahren, im SBR-Reaktor (sequencing batch reactor) und im Schwebebettreaktor-Verfahren. Anaerober Abbau im Kontaktverfahren, im Schlammkontaktverfahren, im Festbett- und Fließbettverfahren, UASB-Verfahren (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reaktor), EASB-Verfahren (Expanded Granular Sludge Bed), Hochlastreaktoren, Nitrifizierung und Denitrifizierung, Verwendung von Feuchtgebieten mit Pflanzenbewuchs (Pflanzenkläranlage).

Zur Entfernung von löslichen, persistenten organischen Stoffen aus z. B. Pestiziden, Arzneimitteln und deren Metabolite tragen biologische Verfahren nur zu einem sehr geringen Anteil bei [Kuch 2003]. Der Haupteleinierungsmechanismus ist in physikalisch-chemischen Methoden zu sehen. Die Separation (Filtration) ist für einige Stoffklassen und pharmazeutische Formulierungen zielführend, für andere Stoffklassen hat eine Oxidation mit O_3 , UV-Strahlung, $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$, UV-Strahlung/ O_3 oder auch die Photokatalyse mit H_2O_2 an TiO_2 -Katalysatoren gute Ergebnisse erzielt. Ein Beispiel ist die Oxidation des Schmerzmittels Paracetamol (Acetaminophenon im nordamerikanischen Raum) mit $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ bzw. O_3/UV -Licht oder die Zersetzung der Anti-

Drei Kategorien von Trennmethoden

Persistente organische Stoffe: physikalisch-chemische Methoden

Baby-Pille mit Ozon.⁶⁰ In Tabelle 2 sind einige Schadstoffe und die zu ihrer vollständigen oder teilweisen Beseitigung geeigneten physikalisch-chemischen Verfahren zusammengetragen.

Tabelle 2: Einige Schadstoffe mit den dazugehörigen Behandlungsmethoden. (Quelle: [BVT 2003b])

| | Feststoffe | TOC BSB | CSB | AOX/ EOX | N _{ges} | NH ₄ -N | PO ₄ -P | Schwermetalle | Öl | Phenol |
|--|------------|------------|-----|-------------|------------------|--------------------|--------------------|---------------|----|--------|
| Sedimentation | X | X | | | | | | X | | |
| Flotation | X | X | | | | | | X | | X |
| Filtration | X | X | | | | | | X | | |
| MF/UF | X | X | | | | | | | | |
| NF/EO | | X | X | X | | | | X | | |
| Ölabscheidung | | X | | | | | | | | X |
| Fällung | | | | | | | X | X | | |
| Kristallisation | | | | | | | X | X | | |
| chemische Oxidation | | X | X | X | | | | | | |
| Nassoxidation | | X | X | X | | | | | X | |
| Oxidation mit überkritischem CO ₂ | | X | X | X | | | | | X | |
| Adsorption | | X | X | X | | | | X | | |
| Ionenaustausch | | X | | | | | | X | | |
| Extraktion | | X | X | X | | | | | | |
| Destillation | | X | X | X | | | | | | |
| Eindampfung | | X | | | | | | X | | |
| Strippen | | X | | X | | X | | | | |
| Verbrennung | | X | X | X | | X | | X | X | X |
| biologisch anaerob | | X | | X | X | | | X | | |
| biologisch aerob | | X | | X | | | X | | | X |
| Nitri-/Denitrifizierung | | | | | X | X | | | | |

TOC: Gesamter organisch gebundener Kohlenstoff; BSB: Gehalt an biologisch abbaubaren Stoffen; CSB: Gehalt an chemisch oxidierbaren Stoffen; AOX: Adsorbierbare organische Halogene; EOX: Extrahierbare organische Halogene.

Kombination
biologischer und
chemischer
Reinigungsstufen
erfolgreich

Beste Aussichten auf eine erfolgreiche Eliminierung von persistenten organischen Verbindungen haben Kombinationslösungen aus chemischer Oxidation und biologischer Behandlung, z. B. im Belebtschlammverfahren. Wirtschaftlich sinnvoll ist es, der teureren Oxidation das Membranbelebtschlammverfahren vorzuschalten, damit die Menge an zu oxidierenden Schadstoffen minimiert wird [Schröder 2003]. Oxidative Methoden können aber auch der Vorbehandlung von Abwasser dienen, wenn der Einsatz biologischer oder physikalischer Methoden sonst nicht möglich wäre (Oxidation der Schadstoffe). Der Einsatz von z. B. photochemischen Verfahren direkt an der Schadstoffquelle kann den

⁶⁰ <http://archiv.tagesspiegel.de/archiv/28.04.2006/2483937.asp>

Aufwand für die Abwasserbehandlung vermindern und zusätzlich die Vermischung mit anderen Abwässern verhindern.

3.3.3 Membrantechnologien

Membranfiltrationsverfahren gewinnen immer mehr an Bedeutung und werden als Schlüsseltechnologie gesehen, da die Reinigungsleistung sehr gut ist und die Anschaffungskosten gesunken sind. Sie finden Anwendung in der Abwasserbehandlung, in kompakten, mobilen Kläranlagen (vgl. Kapitel 3.2.5), in der Wasserentsalzung (vgl. Kapitel 3.3.7), der Gewinnung von Prozess- und Reinstwasser, in der Trinkwasseraufbereitung (vgl. Kapitel 3.3.4) und in der Aufbereitung von Schwimmbadwasser [Hobby 2004]. Die weltweit größte Ultrafiltrationsanlage zur Abwasserbehandlung steht im Großraum Köln-Düsseldorf bei Neuss-Kaarst mit einer jährlichen Reinigungskapazität von 3,2 Millionen m³ Abwasser [Dohmann 2006].

Membranverfahren sind Trennprozesse, in denen Stoffe entsprechend ihrer Größe, Ladung oder anderer Eigenschaften mit Hilfe von semipermeablen Membranen selektiv getrennt und aufkonzentriert werden; es entsteht ein Permeat und ein Konzentrat. Für eine detaillierte Beschreibung von Membranverfahren siehe [Melin 2003].

Membrantechnologien vielfältig einsetzbar. Gute Trennleistung

Trennung von Stoffen entsprechend ihrer Größe

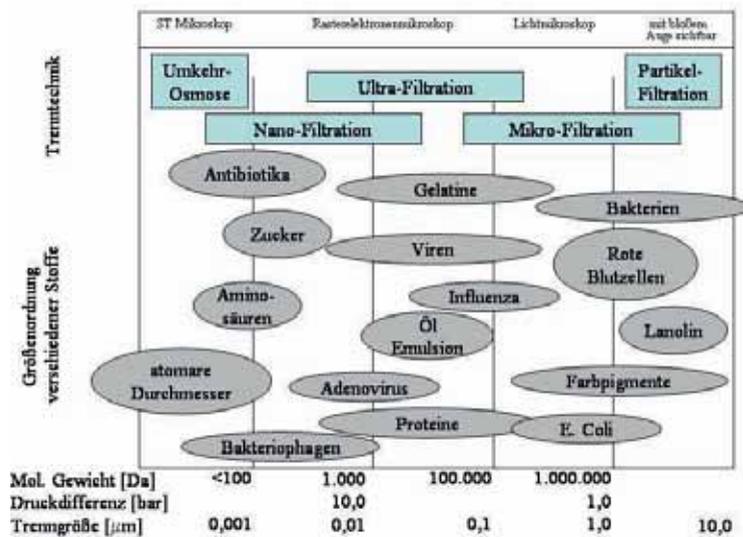


Abbildung 22: Trenngrößen, Molekulargewicht und Druck für die verschiedenen Trennverfahren (eigene Darstellung).

Druckgetriebenes
Verfahren

Der Trennprozess kann durch Druckgradienten (Mikro-, Ultra- und Nanofiltration, Umkehrosmose), Druck- und Konzentrationsgradienten (Gas Separation), elektrische Potenzialgefälle (Elektrodialyse, Membranelektrolyse) oder anderer Gradienten (Pervaporation) angetrieben werden. Bei der Umkehrosmose wird die zu reinigende Lösung unter Druck durch eine semipermeable Membran gepresst. Es kommt zu einer Umkehrung der normalen Osmose (Wasser reichert sich entlang eines Konzentrationsgradienten zwischen zwei Lösungen in der höher konzentrierten an). In manchen Membranverfahren finden auch adsorptive Prozesse statt, bei denen die Schadstoffe an der Oberfläche der Membranen adsorbiert werden.

Porengröße bestimmt
zu trennende Stoffe

Die Porengröße der Membran bestimmt meist die zu trennenden Stoffe, Abbildung 22 gibt einen Überblick über die wichtigsten Membranverfahren, die in der Wasserbehandlung eingesetzt werden.

Als Membranmaterialien kommen z. B. Polymere, Kopolymere und Keramiken mit unterschiedlichen Eigenschaften in Frage (z. B. mikroporös, homogen, assymetrisch, symmetrisch, elektrisch geladene Membran, Kompositmembran); Tabelle 3 gibt hierfür einige Beispiele. Membrane sollten durch eine hohe Lebensdauer gekennzeichnet sein und nicht von Chlor angegriffen werden, da Chlor vielfach zur Desinfektion eingesetzt wird. Häufig verwendete Bauweisen sind Rohr-, Platten- und Hohlfasermembranen.

Tabelle 3: Trennverfahren und dazugehörige Membrantypen, Teilchenart und Beispielanwendung

| Prozess | Membrantyp und -material | Treibende Kraft | Teilchenart | Anwendung |
|----------------------|---|------------------------------|---------------------------|---|
| Mikrofiltration (MF) | symmetrisch-mikroporös: Zellulosenitrat/-azetat, Polyvinylidendifluorid, Polyamide, Polysulfone, PTFE, Metalloxide | hydrostatisches Druckgefälle | kolloid, feindispers | Abtrennung von Feststoffen, Schwermetallen, Ölen, Fetten und Bakterien |
| Ultrafiltration (UF) | assymetrisch-mikroporös: Polysulfon, Polypropylen, Nylon 6, PTFE, PVC, Acryl-Kopolymer | hydrostatisches Druckgefälle | kolloid, makromolekular | Abtrennung von Feststoffen, Schwermetallen, Viren, Makromoleküle, Ölen und Fetten |
| Nanofiltration (NF) | Film-Membran: Zelluloseazetat, aromatische Polyamide | hydrostatisches Druckgefälle | molekular, makromolekular | Abtrennung von Zuckern, Antibiotika, Aminosäuren |

| | | | | |
|---|---|---------------------------------|------------|---|
| Umkehr- osmose (UO) | assymetrisch: Zelluloseazetat, Aromatische Polyamide | hydrostatisches Druckgefälle | ionogen | Trennung von Salz und Mikro- partikeln aus Lösung |
| Gastren- nung | assymetrisch homogen: Polymere und Kopolymere | Partialdruck- gefälle | Gas | Trennung von Gasge- mischen |
| Pervora- tion/ Dampf- permeatio n | assymetrisch homogen: Polyacrylonitril, Polymere | Dampfdruck- gradient | Dampf/ Gas | Trennung azeotropi- scher Gemische |
| Elektro- dialyse | Kationen und Anionen Austauschmembran: sulfoniertes Polystyrol (cross- linked) | Elektrisches Feld | ionogen | Entsalzung ionischer Lösung |

Die Kombination eines Membranverfahrens mit einem biologischen Klärverfahren wird als Membranbioreaktor (Kleinkläranlage mit Membraneinheit) bezeichnet. Die Membrantrennung kann der biologischen Reinigung nachgeschaltet sein, oder die Filtrationseinheit wird direkt in den Bioreaktor eingetaucht. Einsatzgebiete für Membranbioreaktoren reichen von großtechnischen Kläranlagen über Anlagen in kompakter Bauweise, z. B. zum Einsatz in kleineren Klärwerken oder Tierkörperverwertungsanstalten⁶¹, bis hin zu mobilen Anlagen zur Trinkwasseraufbereitung und Abwasseraufbereitung auf Schiffen.

Membranbioreaktoren:
Kombination von
Membranverfahren
mit biologischen
Verfahren

Allgemeine Nachteile der Membrantechnologien sind neben den hohen Anschaffungskosten die große Verstopfungsgefahr der Poren (Scaling), eine biologische Verunreinigung (Biofouling) oder eine Verschmutzung der Membran durch Partikel. Für die Reinigung von Membranen stehen verschiedenen Verfahren zur Verfügung, wie z. B. Forward Flush, Backward Flush, Air Flush, chemische Reinigung und einige weitere Verfahren.

Scaling: Bestimmte Stoffe neigen in aufkonzentrierter Form dazu, als unlöslicher Feststoff auszufallen und sich an den Membranporen abzulagern (z. B. Rost und Kalk). In Wäschereibetrieben ist das Ausfallen von völlig unlöslichen Alkalisilikaten bei einem pH Wert kleiner 9 kritisch.⁶² Um dem entgegenzuwirken, werden dem zu trennenden Gemisch Substanzen zugesetzt, die ein Ausfallen verhindern oder den pH-Wert auf einem bestimmten Niveau halten.

Membranporen können
durch ausfallende
Stoffe verstopfen

⁶¹ <http://www.zenon.com/lang/Deutsch/aktuelles/>

⁶² <http://www.johnsondiversey.com/Cultures/de-CH/OpCo/Your+Business/Textilpflege/Presseclips/>

Auch Biofilme
verengen die
Membranporen

Das **Biofouling** ist in der Nanofiltration und der Umkehrosmose nicht selten und bezeichnet das Wachstum von Mikroorganismen an der Membran oder anderen Teilen des Systems. Zur Abtötung von pathogenen Keimen wird sehr oft Chlor verwendet, was jedoch Membranen aus Polyamiden angreift und zu geringen Lebensdauern führt. Verschiedene neuartige Membranen sind in der Erprobung.

3.3.4 Nanotechnologien

Nanopartikel in
vielen Bereichen der
Wasserreinigung
einsetzbar

Nanoskalige Partikel lassen sich beispielsweise in der Abwasserbehandlung (vgl. Kapitel 3.3.1), der Trinkwasseraufbereitung (vgl. Kapitel 3.3.6) der *ex-situ* und *in-situ* Grundwasserreinigung (vgl. Kapitel 3.2.2) oder der Wasserentsalzung (vgl. Kapitel 3.3.7) einsetzen.

Die in diesen Bereichen eingesetzten Nanotechnologien lassen sich grob in drei Bereiche einteilen: Stofftrennung (z. B. Filtration, Adsorption), nanoskalige Katalysatoren und weitere Nanomaterialien.

Membranen mit
Kohlenstoff-
nanoröhren zeigen
besondere
Durchflusseigen-
schaften

Für die **Stofftrennung** mittels Filtration bieten sich nanoporöse Membranen an. Materialien, die als Nanofilter zum Einsatz kommen, beinhalten Zeolithe, Keramiken und nanoporöse Polymere [GDNP 2006]. Membranen mit gepackten Kohlenstoffnanoröhren zeigen im Experiment besonders hohe Durchflusseigenschaften und könnten Filtrationsprozesse besonders in der Wasserentsalzung begünstigen.⁶³ Für die Adsorption bieten sich neben entsprechenden Membranen auch Nanofasern, Kohlenstoffnanoröhren oder die bereits bei der Grundwassersanierung beschriebenen SAMMS (self-assembled monolayers on mesoporous supports) an. Mit oxidierten Aluminium-Nanofasern konnten beispielsweise Bakterien und Viren quantitativ aus Wasser gefiltert werden⁶⁴. Kohlenstoffnanoröhren (CNT) können zur Adsorption von Arsen-Verbindungen und anderen Schwermetallen (Blei, Kupfer und Cadmium) auch in Verbindung mit Ceroxid (CeO₂) eingesetzt werden [Peng 2005]. CNTs wurden sogar als „Superabsorber“ für Dioxine bezeichnet, da sie eine um mehrere Größenordnungen höhere Affinität zu Dioxinen zeigten als Aktivkohle [Long 2001]. Die Herstellungskosten von CNTs sind im Vergleich zu Aktivkohle um mindestens zwei Größenordnungen höher und auch die Verfügbarkeit von CNTs reicht noch nicht an die von Aktivkohle heran, so dass ein großflächiger Einsatz von CNTs in naher Zukunft unwahrscheinlich ist.

Nanokatalysatoren
zeichnen sich durch
ein großes
Oberflächen/Volumen-
Verhältnis aus

(Nano-) Katalysatoren verändern die Reaktionsgeschwindigkeit chemischer Reaktionen und gehen aus diesen unverändert hervor. Das Verfahren der Katalyse hat für fast alle Industriezweige und auch im Wassersektor eine hohe Bedeutung, denn Schadstoffe sind so unter

⁶³ <http://news.rpi.edu/update.do?artcenterkey=435>

⁶⁴ <http://argonide.com/>

milderen Reaktionsbedingungen reduzier-, oxidier- und abbaubar. Nanoskalige Katalysatoren sind durch ein großes Oberflächen/Volumen-Verhältnis gekennzeichnet und haben im Allgemeinen eine hohe katalytische Aktivität. Neben der großen Oberfläche sind hierfür die ungewöhnlichen Formen von Nanokristallen verantwortlich. Es kann zu einer hohen Konzentration von reaktiven Ecken und Kanten mit Fehlstellen (defect sites) kommen, was ebenfalls eine erhöhte Oberflächenreaktivität zur Folge hat. In einigen Fällen entwickeln reaktionsträge Stoffe, wie das Edelmetall Gold, erst ab einer Partikelgröße von einigen Nanometern signifikante katalytische Aktivität. Ein nanoskaliger Goldcluster beschleunigt z. B. die Umsetzung von giftigem Kohlenmonoxid zu ungiftigem Kohlendioxid [Yoon 2005].

Nullwertige Eisenpartikel im Mikromaßstab sind heute verbreitet im Einsatz zum Abbau von leicht flüchtigen halogenierten Kohlenwasserstoffen (LHKW) und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen [Cao 2005]. Nanoskalige, nullwertige Eisenpartikel (nanoscale zero-valent Iron, Fe(0), NZVI) stoßen zunehmend auf Interesse, insbesondere wegen ihrer höheren Reaktivität und dem damit verbundenen Potenzial in der Grundwasser- und Altlastensanierung (siehe Kapitel 3.2.2). Eisenoxid-Nanopartikel werden zur Beseitigung von Arsen und anderen Schwermetallen eingesetzt.

Nanoskalige Eisenpartikel eliminieren u. a. giftige Arsenverbindungen

Ein weiterer bedeutender Katalysator ist nanoskaliges Titandioxid (TiO₂). Er fungiert als Photokatalysator, und im Zusammenspiel mit Wasser, O₂ und UV-Strahlung entstehen reaktive freie Radikale, die Schadstoffe in harmlosere Substanzen umwandeln können. Im Fokus stehen hier chlorhaltige und persistente organische Verbindungen. Nanoskaliges TiO₂ lässt sich als Pulver oder granulares Medium herstellen und kann auch in Beschichtungen oder (Komposit-) Membranen eingebracht werden. Für die Photokatalyse sind neben TiO₂ auch andere nanostrukturierte katalytisch aktive oder nanoskalige Halbleiter, wie ZnO, ZnS und CdS geeignet. Auch Nano-beschichtete Titandioxid Partikel, die nicht mehr so leicht agglomerieren, sind in der Erprobung.⁶⁵

Photokatalyse mit nanoskaligem Titandioxid: Beseitigung von z. B. chlorhaltigen Verbindungen

Weitere **Nanomaterialien**, die für die Wasserreinigung zum Einsatz kommen können, sind beispielsweise magnetische Nanopartikel. Sie dienen dazu, Schadstoffe, wie Schwermetalle oder organische Substanzen, in Wasser zu adsorbieren. Mittels eines Magneten können die Nanopartikel zusammen mit den Schadstoffen aus dem Wasser extrahiert werden. Je nach Oberflächenbeschaffenheit reagieren die Partikel selektiv mit den gewünschten Zielmolekülen. Arsen steht hierbei besonders im Fokus, da diese giftige Substanz in Entwicklungsländern in

Magnetische Nanopartikel zur Beseitigung von Arsenverbindungen im Fokus

⁶⁵ <http://www.fotocide.com/>

vielen Gewässern zu finden ist [GDNP 2006]. Weitere Nanomaterialien beinhalten nanoskaliges Silber oder auch funktionalisierte Dendrimere.

Ebenfalls von Bedeutung sind **Nanosensoren** zur Detektion von Verunreinigungen und Pathogenen. Nanosensoren können Schwermetalle, einzelne Zellen, organische Substanzen, Viren, Bakterien oder Mikroben detektieren und stellen damit ein wichtiges Instrument zur Überwachung der Wasser- und Gewässergüte dar. Auch zur kontinuierlichen Gewässerüberwachung sind sie einsetzbar. Für einen Überblick über aktuelle Entwicklungen vergleiche [EPA 2005].

3.3.5 Analytische Methoden - Sensorik

Moderne Sensoren unterschiedlicher Konstruktionsweisen dienen der Eruiierung von Wasser-, Boden-, und Luftqualität. Einige Beispiele und mögliche Anwendungsfelder werden im Folgenden dargestellt.

Sensoren:
Überwachung der
Gewässergüte

Bio- und Nanosensoren können gezielt Toxine und Pathogene auch in aquatischer Umgebung detektieren. Biochemische Sensoren, eingebettet in mikrofluidische Chips, können zur Detektion unterschiedlicher Substanzen konzipiert werden und lassen eine Überwachung der Umwelt zu. Sensoren kommen auch in alltäglichen Haushaltsgeräten zum Einsatz. In Waschmaschinen wird der Trübungsgrad des Wassers bestimmt. In Wasserwerken dienen umfangreiche Messsysteme mit Gassensoren der Überwachung der Wassergüte.

Sensoren in der
Landwirtschaft
optimieren die
Bewirtschaftung

In der Landwirtschaft werden Sensoren zur Überwachung der Bodenfeuchte im Rahmen von automatisierten und optimierten Bewässerungsplänen eingesetzt. Auch satellitengestützte Methoden sind von Interesse, um Boden-, Bewuchs-, Geo-, und Gewässerdaten zu sammeln.

Geosensoren in Flugzeugen oder Helikoptern dienen der Detektion von Untergrund-Anomalien um z. B. eine Absenkung des Bodens wegen eines sinkenden Grundwasserspiegels vorhersagen zu können [Wired 2006].

3.3.6 Trinkwasseraufbereitung

Der Begriff Trinkwasseraufbereitung beschreibt die Gesamtheit an technologischen Verfahren zu Verbesserung der Wasserqualität, bis die jeweils geltenden Trinkwassernormen erfüllt sind. Die Aufbereitung von Rohwasser (Quell-, Grund-, Talsperren- oder Oberflächenwasser, auch Uferfiltrat⁶⁶) ist notwendig, um Verunreinigungen, z. B. feste Partikel

Aufbereitung von
Rohwasser bis zur
Trinkwasserqualität

⁶⁶ Wasser aus Brunnen in unmittelbarer Nähe von Flüssen oder See; enthält große Anteile Oberflächenwassers.

oder Keime zu beseitigen; das zu verwendende Verfahren hängt von der Wasserqualität ab. Das gereinigte Trinkwasser wird in Wassertürmen oder betonierten Säulenhallen bis zur Einspeisung in die Wasserleitungen gelagert. Deutschlands größte Anlage zur Trinkwasseraufbereitung mittels Membranfiltration wird derzeit in Roetgen in der Eifel errichtet. Sie soll 32 Millionen m³ Trinkwasser produzieren und 500.000 Einwohner versorgen [Dohmann 2006].

Verschiedene physikalische, chemische und biologische Methoden stehen für die Reinigung zur Verfügung: Zu den wichtigsten in Deutschland zugelassenen gehören die Flockung, die Sedimentation, die Filtration, die Oxidation (ClO₂, Cl₂, O₃/H₂O₂, H₂O₂/UV-Strahlung), die Neutralisation, die Entkeimung (Hitze, UV-Strahlung) und die Desinfektion (O₃/H₂O₂/UV-Strahlung, Ultraschall und Cl₂). Besonders die photochemische Oxidation mit UV-Strahlung und einem Oxidationsmittel (meist O₃ oder H₂O₂) eignet sich, toxische Substanzen und biologische Verunreinigungen partiell oder ganz zu oxidieren. Das Rohwasser kann dann einer weiteren biologischen Reinigung zugeführt werden. Wasserstoffperoxid zur Trinkwasseraufbereitung wird bisher nur in wenigen Wasserwerken verwendet, wie z. B. im Wasserwerk Rostock. Dort wird die H₂O₂-Dosierung an die vorherige Ozonung angepasst; in Frankreich oder den USA wird H₂O₂ zusammen mit O₃ im Gegen- oder Gleichstrom appliziert [Gilbert 2005]. Seine optimale Oxidationswirkung entfaltet Wasserstoffperoxid in Gegenwart eines Katalysators, wie Eisenionen (Fentons Reagenz).

Verschiedene Verfahren stehen zur Verfügung, z. B. Chlorung oder Ozonung

Neben der Vernichtung pathogener Keime ist die Verringerung von hohen organischen Partikelfrachten von vorrangiger Bedeutung, da es zur Entstehung toxischer Substanzen bei der Verwendung von chlorhaltigen Substanzen kommen kann. Die Kombination von Eisen- und Aluminiumsalzen zur Flockung, die oxidative Aufbereitung mit Ozon und eine anschließende Desinfektion mit Cl₂ sind mögliche Lösungen [Doll 2005].

Im Fokus: Verringerung der Partikelfracht

Die Behandlung des Rohwassers mit Chlor ist ein Standardverfahren. Wenn jedoch der pH-Wert ins alkalische abgeleitet, sind vergleichsweise hohe Chlor-Konzentrationen notwendig, um eine ausreichende Leistung zu gewährleisten, was zu Korrosion von Stahlteilen und der Bildung adsorbierbarer Halogenverbindungen (AOX) bei Verwendung vieler organischer Substanzen führen kann.

Für die Beseitigung häufig vorkommender Schadstoffe, wie z. B. Arsen können die Reverse Osmose, die Destillation, Ionenaustauscher, aktiviertes Aluminium, Eisenoxid und Nanotechnologien verwendet werden [Water 2006].

Beseitigung von Toxinen, z. B. auch mit Ionenaustauschern

Die Bestrahlung mit UV-Licht zur Entkeimung gilt als zukunftssträchtiges Verfahren zur Keimabtötung. Die Technik ist auch für mobile Anwendungen, wie beim Camping oder in Entwicklungsländern geeignet. Handliche „UV-Stäbe“, auch in Verbindung mit Solarzellen zur Energiegewinnung sind für den Privatgebrauch erhältlich.⁶⁷

Zukunftsträchtig:
Entkeimung durch UV-
Licht aus
Leuchtdioden

Neue Materialien könnten die traditionell verwendeten Quecksilberdampflampen zur Erzeugung der UV-Strahlung, die eine beschränkte Lebensdauer (in etwa vergleichbar mit der von Glühbirnen) und hohe Giftigkeit aufweisen, ablösen. Die Anfang der 1990er Jahre vorgestellten Galliumnitrid (GaN) Leuchtdioden sind vom Material her unschädlich, haben eine zehn- bis hundertmal so hohe Lebensdauer, sind von kompakter Bauweise und lassen sich ersten Versuchen zufolge für die Keimabtötung in Wasser einsetzen.

Mobile
Aufbereitungsanlagen
für Krisengebiete von
Bedeutung

Mobile Trinkwasseraufbereitungsanlagen sind vor allem für Krisengebiete von großer Bedeutung. Oftmals bricht die örtliche Trinkwasserver- und Abwasserentsorgung völlig zusammen, die Gefahr von Seuchen durch den Genuss von verunreinigtem Trinkwasser steigt schnell. Mobile Trinkwasseraufbereitungsanlagen sollten kompakt und stabil in der Bauweise, je nach Anforderung optimal dimensionierbar, vor Witterung und Fremdeingriff leicht zu schützen sowie leicht zu transportieren sein. Beispiele solcher Anlagen sind Container-Trinkwasseraufbereitungsanlagen, die komplett in einem seefesten Transportcontainer oder LKW untergebracht sind und direkt an den Wirkort transportiert werden können. Mobile Systeme können zwischen 750 und 3.785 Liter Trinkwasser pro Minute produzieren und bis zu 18 Monate in Betrieb bleiben. Mobile Trinkwasseraufbereitungsanlagen basieren fast immer auf Niederdruck-Membranfiltern in Verbindung mit einer abschließenden Desinfektion für besonders kleine Schadstoffe oder Viren, die die Membran passieren können.

3.3.7 Wasserentsalzung

15.000
Meerwasserent-
salzungsanlagen -
Tendenz steigend

Etwa 15.000 Meerwasserentsalzungsanlagen in mehr als 125 Ländern produzieren rund 38 Millionen Kubikmeter Trinkwasser am Tag. In trockenen Gebieten mit Meerzugang stellt die Meerwasserentsalzung eine sehr wichtige Form der Trinkwassergewinnung dar. Die MENA Region (Middle East, North Africa) hält die Hälfte der weltweiten Entsalzungskapazitäten vor; Saudi-Arabien produziert täglich sechseinhalb Millionen Kubikmeter Wasser aus Meerwasser.

⁶⁷ <http://www.osram.de/produkte/uv-ir/uvc.html>

Die Hauptverfahren zur Entsalzung von Meer- oder salzhaltigem Brackwasser sind die Destillation (Verdunstung mit anschließender Kondensation des Wasserdampfes, MSF (Multi Stage Flash)- und MED (Multi Effect Humidification/Dehumidification)-Verfahren) und die Umkehrosmose. Beide Verfahren sind energieintensiv. Bei der Verdampfung werden ca. 15-25 kWh pro m³ entsalzten Wassers benötigt, die Umkehrosmose braucht hingegen nur 1,5-2,5 kWh pro m³ entsalztes Wasser [Science 2006]. Derzeit nutzen etwa 80 % der Anlagen das Verdunstungsverfahren und 20 % die Umkehrosmose. Durch sinkende Preise für Membranen wird die Umkehrosmose interessanter.⁶⁸

Entsalzungsverfahren sind energieintensiv

Die für die Entsalzung nötige Energie wird in den Anrainerstaaten des persischen Golfs aus Erdöl gewonnen. Die meisten Anlagen sind Hybridanlagen, die auf dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung arbeiten. Die Abwärme von Kraftwerken wird hierbei zur Erhitzung des zu entsalzenden Wassers verwendet und so deutlich weniger Energie verbraucht.

Energie aus Erdöl in den Staaten des persischen Golfs

Länder ohne größere Ölvorkommen verwenden bevorzugt die Umkehrosmose, wie die USA (Kalifornien, Großanlage am Colorado River mit einer Kapazität von 270.000m³/Tag), Israel (Großanlage in Ashkelon 2005 in Betrieb genommen, Anlage in Hadera geplant) oder Deutschland (Helgoland). Das Verfahren zeichnet sich zwar durch niedrigere Energiekosten aus, ist aber wartungsintensiv und mit hohen Instandhaltungskosten verbunden.

Länder ohne Ölvorkommen nutzen die Umkehrosmose

Alternative Energien für die Entsalzung

Da Wassermangel und hohe Sonnenstrahlung oftmals regional zusammenfallen, wird Sonnenenergie seit Jahrhunderten zur Wasserentsalzung benutzt. Die erste so genannte Solardestille „Las Salinas“ ging 1872 in Chile in Betrieb. Die bedeckte eine Fläche von 4.730 m² und produzierte bis zu 22,7 m³ Wasser am Tag. Salziges Wasser wird in ein Becken gegeben, das durch die Sonne verdunstende Wasser wird an einer Glasscheibe oder Leinentüchern kondensiert und in einer Auffangrinne gesammelt. Die Produktionsrate ist jedoch selbst bei optimierten Verfahren gering (3-5 Liter Wasser pro m²), denn bei diesen Geräten wird die aufgewendete Verdampfungsenthalpie (2.500 kJ/kg) bei der Kondensation nicht zurück gewonnen, und das Verhältnis von Verdunstungsfläche und solarer Aperturfläche ist gleich und damit die Verdunstungsrate weit unterhalb der energetischen Möglichkeiten.

Solarthermische Entsalzungsanlagen in Regionen mit hoher Sonneneinstrahlung

Eine Trennung von Verdunstungs- und Energieadsorptionsfläche – wie in solarthermischen Entsalzungsanlagen realisiert – umgeht diese Probleme. Verschiedene Anlagentypen werden seit den 1980er Jahren u. a. in Oman

⁶⁸ „Deutsche Meerwasserentsalzung“ in VDI Nachrichten vom 10.06.2005

(Muscat), in den Vereinigten Arabischen Emiraten (Abu Dhabi), in Tunesien, Namibia (Projekt Okashana), Cran Canaria (Projekt SODESA) oder in Spanien (Plataforma Solar de Almeria) getestet.

Die kompakte Bauweise einiger Anlagen ermöglicht auch einen dezentralen Einsatz in strukturschwachen Regionen, in denen weder Geld noch Personal für aufwändige Technik zur Verfügung steht [Müller-Holst 2002]. In Verbindung mit Photovoltaik kann eine vollständig autonom arbeitende Anlage erstellt werden.

Kopplung von
Solarkraftwerken und
Entsalzungsanlagen

Die Kopplung von Solarkraftwerken mit Entsalzungsanlagen zur gleichzeitigen Energie- und Trinkwassergewinnung könnte das Betreiben von Solarkraftwerken attraktiver machen [Nitsch 2004].⁶⁹ In solarthermischen Kraftwerken wird direktes Sonnenlicht durch Spiegelsysteme gebündelt und die Wärme zur Stromproduktion einer Turbine verwendet. Im Februar 2006 ist seit 15 Jahren erstmals wieder ein Solarkraftwerk in Kalifornien im Bau.⁷⁰



Abbildung 23: Kopplung von solarthermischem Kraftwerk (links) mit einer Meerwasserentsalzung (rechts). (Quelle: VDIIVDEIIT)

Weitere alternative
Energiequellen

Eine alternative Möglichkeit ist die Kopplung von Windenergie- und Entsalzungsanlage. Die kinetische Energie, also die Bewegungsenergie des Rotors, wird direkt genutzt, um eine modifizierte Wasserentsalzungsanlage zu betreiben. Die erneuerbaren Energien Wind, Geothermie und Gezeitenenergie spielen jedoch bisher nur eine untergeordnete Rolle in der Wasserentsalzung.

Probleme bei der Wasserentsalzung sind neben den hohen Energiekosten die aufkonzentrierte Salzsole, deren Rückleitung ins Meer zu einer Bedrohung des marinen Lebens führt. Auch Chemikalien, die dem Salzwasser beigefügt werden, um ein Verkrusten der Wärmetauscher zu vermeiden, sind für die Flora und Fauna nicht unbedenklich.

⁶⁹ <http://www.itas.fzk.de/deu/tadn/tadn013/trmi01a.htm>

⁷⁰ <http://www.schott.com/german/news/press.html?NID=1838>

Alternative Entsalzungsverfahren

Die Verwendung von warmem Kühlwasser aus dem Betrieb von herkömmlichen Kraftwerken in Verbindung mit einem neuartigen Diffusionsverfahren zur Entsalzung haben Forscher aus Florida entwickelt und patentieren lassen. Das ca. 80 °C warme Wasser wird in einem diffusionskontrollierten Prozess an einer Polyethylen-Oberfläche verdampft und anschließend kondensiert [Heuer 2005]. Das Verfahren könnte die Wasserentsalzung wesentlich kostengünstiger machen.

Alternative Verfahren zur Entsalzung

Ein weiteres als DevaporationTM bezeichnetes Verfahren arbeitet mit einem Luftbefeuchtungs- und Entfeuchtungs-Kreislauf. Salziges Wasser wird in einem Entsalzungsturm auf Polyethylen-Lamellen geleitet und rinnt an ihnen hinunter. Von unten wird warme Luft eingeblasen, die sich auf dem Weg durch den Turm mit Wasser anreichert. An der Spitze des Turms hat es eine Temperatur von bis zu 93 Grad Celsius und eine relative Luftfeuchtigkeit von 98 % erreicht. Es wird in eine zweite Kammer, die Taukammer geleitet; eine Trennwand zwischen den Kammern dient als Wärmetauscher. Das Wasser kondensiert an der Wand, die Wärme wird abgegeben und am Boden sammelt sich das Tauwasser. Das Verfahren ist so ergiebig, dass damit sogar Wasser aus einer normalen Umkehrosmose weiter gereinigt werden kann. Ein entsprechendes Pilotprojekt ist in einer Kläranlage in Phoenix im Test. Weitere Verfahren zur Wasserentsalzung sind die Elektrodialyse, das Ausfrierverfahren, die Membran-Destillation und die Forward Osmose [Science 2006].

Devaporations-Verfahren in Pilotprojekten getestet

3.3.8 Wasser aus Luft

Bei diesem Verfahren wird der Umgebungsluft das Wasser durch Kondensation entzogen. Die Geräte zur Trinkwassererzeugung saugen Luft an und kühlen sie bis zum Taupunkt ab. Das entstehende Wasser wird gesammelt und weiterbearbeitet. Die kalte Luft kann zur Raumklimatisierung verwendet werden, was besonders in sehr warmen Regionen ein positiver Nebeneffekt ist. Die Wasserkondensation ist nur bei einer Mindestluftfeuchte von etwa 30 % sinnvoll und ist selbst dann relativ kostenintensiv (6,5 kWh pro Liter Wasser bei 50 % Luftfeuchte und 20 °C).⁷¹

Kondensation von Wasser aus der Umgebungsluft

Andere Verfahren zur Wassergewinnung aus Luft beinhalten die Verwendung hygroskopischer Stoffe wie LiCl₂ oder LiBr₂ in Verbindung mit Umkehrosmose zur Reinigung oder der Gewinnung von Wasser aus

⁷¹ <http://www.heise.de/tp/r4/artikel/18/18425/1.html>

Abgasen, das in einer mobilen Einheit bis zur Trinkwasserqualität gereinigt werden kann.⁷²

3.3.9 Trends und aktuelle Projekte

Membrantechnologien
sind stark
nachgefragt

Ein deutlicher Trend in der Abwasserbehandlung und der Wasserentsalzung geht in Richtung der Membrantechnologien. Diese universell einsetzbaren Techniken werden zunehmend Standard, insbesondere wegen fallender Preise für Membranen, verbesserter Pumpsysteme und effizienteren Anlagen. Nanotechnologische Innovationen in der Entwicklung neuer Membranen sind zukunftsweisend. Die Potenziale von Membranen mit z. B. Kohlenstoffnanoröhren sind noch weitgehend unbekannt. Die Reinigungsleistung von Membransystemen übertrifft herkömmliche Systeme, sie sind vor allem in Kombination mit biologischen Reinigungsstufen in Bioreaktoren universell einsetzbar in der Abwasserbehandlung, der Trinkwasseraufbereitung und der Wasserentsalzung. Sie lassen sich in kompakter Bauweise fertigen und bilden die Basis für dezentrale Systeme.

Alternative
Verfahren zur
Wasserdesinfektion
ebenfalls interessant

Alternative Methoden zur Wasserdesinfektion sind ebenfalls gefragt, der Trend geht zu Behandlung mit UV-Strahlung unter Verwendung von Halbleitertechnologien sowie dem Einsatz von Ozon. Verfahrenslösungen zur Eliminierung persistenter organischer Stoffe sind von Bedeutung, die Problematik der Gewässerbelastung mit diesen Stoffklassen ist erst in den letzten Jahren genauer untersucht worden.

- Eine Pilotkläranlage in St. Wendel bereitet seit 2005 Abwasser mittels einer keramischen Filtermembran auf, die aus nanoskaligen Poren besteht.⁷³
- In den Projekten AMEDEUS und EUROMBRA fördert die europäische Kommission die Entwicklung und Anwendung von Membranbioreaktoren in kommunalen Kläranlagen mit 12 Millionen Euro für einen Zeitraum von 2005-2008. Hier sollen die Senkung der Betriebs- und Herstellungskosten und die Erhöhung der Konkurrenzfähigkeit analysiert sowie Lösungsansätze für das Problem mit biologischen Ablagerungen an der Membran (Fouling) gefunden werden.
- Forschern am Lawrence Livermore National Laboratory gelang die Entwicklung einer neuen Filtermembran, die mit regelmäßig angeordneten Kohlenstoffnanoröhren bestückt ist. Die Durchflussraten durch die nanoskaligen Poren waren hierbei

⁷² http://www4.army.mil/ocpa/read.php?story_id_key=5311

⁷³ <http://www.bund-saar.de/cms/upload/umags0504/16-17.pdf>

10.000-mal größer als nach klassischen Berechnungen zufolge zu erwarten war. Die Ursachen für dieses Verhalten sind noch ungeklärt. Ein mögliches Anwendungsgebiet könnte die kostengünstige Meerwasserentsalzung sein. Der Einsatz der neuen Membran könnte bis zu 75 % weniger Energie verbrauchen als die Umkehrosmose [Risbud 2006].

- Forscher der RWTH Aachen untersuchen Filtrationstechniken und Membranbioreaktoren zum Rückhalt endokrin wirksamer Stoffe.⁷⁴
- Wissenschaftler am MIT haben einen neuartigen Kunststoff entwickelt, der gleichzeitig Wasser anziehend und abstoßend ist. Das Material besteht aus Schichten von Polymeren mit unterschiedlichen Eigenschaften sowie Quarz-Nanopartikeln und einer Oberfläche aus wachsartigem, fluoriertem Silan. Auftreffendes Wasser nimmt sofort Kugelform an und wird von der Oberfläche angezogen. In Trockengebieten ließe sich dieses System zum Sammeln von Feuchtigkeit oder in der Wasserentsalzung einsetzen.⁷⁵
- Im australischen Port Kembala in Sydney soll die Energie eines Wellenkraftwerks direkt für eine Wasserentsalzungsanlage, basierend auf dem Prinzip der Umkehrosmose, verwendet werden. Die Anlage könnte einige hunderte umliegende Haushalte mit Wasser versorgen und wichtige Erkenntnisse zu dieser Technik generieren.⁷⁶
- Die Anreicherung von Grundwasserreserven mit alternativen Wasserressourcen, vorrangig in Spanien, Portugal, Griechenland, Israel und Palästina (Gaza Streifen) untersucht ein wissenschaftliches Konsortium aus neun Ländern im Rahmen des Projektes GABARDINE. Die europäische Kommission fördert das Projekt mit 2,5 Millionen Euro für die Jahre 2005-2008.⁷⁷
- Forscher des Ferdinand-Braun-Instituts für Höchstfrequenztechnik (FBH) in Berlin entwickeln die Technik der GaN-Leuchtdioden für die Keimabtötung in der Trinkwasseraufbereitung weiter.⁷⁸
- Chlorresistente Polymermembranen finden sich in der Erprobung. Sie lassen mehr Wasser passieren und haben eine deutlich erhöhte Lebensdauer [Science 2006].

⁷⁴ <http://www.uwf.rwth-aachen.de/ageesa/de/themenubersicht.html>

⁷⁵ <http://www.heise.de/tr/artikel/73719>

⁷⁶ <http://www.heise.de/tp/r4/artikel/21/21430/1.html>

⁷⁷ <http://www.juraforum.de/forum/t63223/s.html>

⁷⁸ <http://idw-online.de/pages/de/news151566>

4 MARKTPOTENZIAL

4.1 Trends und Potenziale auf dem Wassermarkt

Generell zählen Wasseraufbereitung und Abwasserreinigung zu den traditionellen und gut entwickelten Sektoren der Umwelttechnologie. In Deutschland betreiben etwa 6.700 meist kommunale Unternehmen die Trinkwassergewinnung in 18.000 Wasseraufbereitungsanlagen. Wasser- und Abwassertechnik ist mit einem jährlichen Exportvolumen von 13 Mrd. US-\$ einer der Exportschlager der deutschen Umwelttechnik. Die Tübinger Unternehmensberatung Helmut Kaiser Consultancy schätzt, dass der Wassermarkt von 287 Milliarden US-\$ im Jahr 2004 auf 412 Milliarden US-\$ im Jahr 2010 wachsen wird. Innovationen sind wegen steigenden Wasserbedarfs (demand pull) entlang der gesamten Wertschöpfungskette von der Wassergewinnung, dem Transport und der Verteilung bis zur Entsorgung und Reinigung zu erwarten. Technologische Lösungen spielen hierbei eine zentrale Rolle (technology push).

Wasserbranche gilt als gut entwickelt in Deutschland

Trends auf dem Wassermarkt werden bestimmt von einer Internationalisierung des Geschäfts, der Nachfrage nach ganzheitlichen Wassermanagement-Systemen und industriellen Recycling-Techniken sowie chemiefreien/chemiearmen Lösungen, wie z. B. physikalische Verfahren zur Abwasserbehandlung oder dem Einsatz von biotechnologischen Verfahren. Strengere nationale und internationale Auflagen sind Treiber von technischen Entwicklungen. Im Folgenden werden einige technologische Trends und deren Potenziale auf dem Wassermarkt näher beleuchtet.

Steigender Wasserbedarf zieht Innovationen entlang der gesamten Wertschöpfungskette nach sich

Membranverfahren gelten als Schlüsseltechnologien. Sie zeigen hohe Trennleistungen und können für ein breites Spektrum von Anwendungen eingesetzt werden, wie z. B. in der Abwasserbehandlung, der Trinkwasseraufbereitung und der Wasserentsalzung.

Für 2010 wird im Sektor der Membranfilter eine Nachfrage von 3 Milliarden US-\$ erwartet.⁷⁹ Die Mikrofiltration ist mit einem Umsatz von 792 Millionen US-\$ in 2005 und einem erwarteten Umsatz von 1,2 Milliarden US-\$ in 2010 bei einem jährlichen Wachstum von 10,3 % marktführend. Auch für die Umkehrosmose wird ein deutliches Wachstum von 10,3 % prognostiziert.⁸⁰ Fallende Produktionskosten (seit 1990 sind z. B. die Kosten für Mikrofiltrationsmembranen um 80 %

Die Nachfrage nach Membranverfahren wächst stark

⁷⁹ Membrane Separation Technologies to 2010, The Freedonia Group 2006

⁸⁰ The Membrane Microfiltrations Market, BCC Market Research 2006

gesunken), eine steigende Nachfrage, besonders von Seiten der Industrie, begünstigen diese Entwicklung.

Nanofiltration auch
in Deutschlands
Unternehmen gefragt

In Deutschland ist neben den klassischen Versorgern, wie RWE, insbesondere Siemens bei der Umsetzung nanotechnologischer Innovationen im Wassersektor aktiv. Durch die Beteiligung der Siemens Venture Capital (SVC) an dem Filtrationsanlagenhersteller Inge AG und der Akquisition von USFilter hat sie sich eine gute Ausgangsposition geschaffen, um ein Global Player im Wassergeschäft zu werden. Siemens will bei der Ultrafiltration der führende Technologieanbieter werden und im Jahr 2010 bereits einen Umsatz von mindestens 100 Mio. € erzielen. Auch der Automobilhersteller Ford setzt in Deutschland innovative Nanofiltrationstechnologien zur Aufarbeitung von Abwässern ein, die bei der Lackierung in der Automobilproduktion anfallen. Eine Pilotanlage wurde im Fordwerk Saarlouis installiert, die als Vorbild für Automobilproduktionsanlagen weltweit dienen soll.

Alternative Verfahren zur Keimabtötung im Wasser, wie Ozonung und die Bestrahlung mit UV-Licht, können als Enabling Technologies angesehen werden. Es handelt sich um einfache und nebenwirkungsfreie Techniken, die auch dezentral und in kompakter Bauweise umgesetzt werden können.

Markt für
Wasserdesinfektion
stark wachsend

Der Markt für die Wasserdesinfektion liegt bei ca. 5 Milliarden US-\$ mit einem jährlichen Wachstum von 10-15 %, die Chlorung mit Chlorgas hat mit 85 % den größten Marktanteil. Eine Desinfektion des Abwassers, wie in den USA Standard, wird hierzulande auch gefordert. Begünstigt wird das starke Wachstum dadurch, dass durch herkömmliche Desinfektionsverfahren mittlerweile gesundheitliche Schäden nicht mehr ausgeschlossen werden und für einige Nebenprodukte der Verdacht der Kanzerogenität besteht.

Wasserentsalzung
für aride Länder
einzigste Chance
Wasserknappheiten
zu mildern

Die **Wasserentsalzung** ist für aride Länder mit Meerzugang eine wichtige Technologie. Seit 1975 ist ein exponentielles Wachstum zu verzeichnen. Die Produktionskosten für die Umkehrosmose-Techniken konnten in den letzten Jahren jährlich um 10 % gesenkt werden. Experten zufolge ist das Einsparungspotenzial noch nicht ausgeschöpft, und mit einer weiteren deutlichen Preisreduktion ist zu rechnen. Technologische Innovationen führen zu einem geringeren Energieverbrauch und effizienteren Anlagen. Moderne Anlagen, wie z. B. in Ashkalon, Israel, produzieren Wasser für 0,527 US-\$ pro m³.

Der Schweizer Vermögensverwaltung Sustainable Asset Management (SAM) zufolge wird die Bedeutung der Meerwasserentsalzung zunehmen und das Marktvolumen von heutigen drei Milliarden Dollar auf 70

Milliarden Dollar in 2020 anwachsen. Für die MENA Region wird das größte zukünftige Marktvolumen (2 Milliarden US-\$ in 2010) gesehen, für den asiatischen Raum ein Wachstum auf eine Milliarde US-\$. Auch andere Regionen setzen verstärkt auf die Wasserentsalzung, um Wasserknappheiten zu vermindern. In England sollte nach den Vorstellungen des privaten Versorgers Thames Water eine Entsalzungsanlage im Themse Delta entstehen, die im Laufe des Jahres 2009 den Betrieb aufnehmen sollte. Londons ehemaliger Bürgermeister Ken Livingstone blockierte das Projekt im Antragsverfahren, und bis heute befindet es sich in einer Sackgasse [Power 2008].

Abwasserbehandlung

Das Volumen des gesamten Abwassermarktes verzeichnet ein jährliches Wachstum von 10-15 % bei einem weltweiten Volumen von 10 Milliarden US-\$ [SAM 2006]. Hierbei ist zu bedenken, dass nur ein Bruchteil der heutigen Abwässer geklärt wird, und sich daraus ein großes Marktpotenzial ergibt. Wasser- und energiesparende Aufbereitungstechniken haben große Wachstumschancen.

Nur wenige Abwässer weltweit werden geklärt

Biologische Verfahren zur Abwasserbehandlung sind führend und werden auch weiterhin eine zentrale Rolle in der Wasseraufbereitung spielen. Sie sind kostengünstig, energieeffizient und überzeugen durch gute Reinigungsleistungen. Eine der biologischen Reinigung folgende Mikro-, Ultra- oder zunehmend auch Nanofiltration als massentaugliche Anwendung wurde schon zu Beginn der 1990er von einigen Autoren vorgeschlagen und ist derzeit vielerorts in der Diskussion; ein flächendeckender Einsatz wird mit sinkenden Anschaffungs- und Betriebskosten wahrscheinlich. Neue Technologien, wie Membranbioreaktoren, sind besonders viel versprechend; Japan und die USA gelten als führend auf diesem Gebiet. Für den Membranbioreaktor-Markt in den USA wird ein jährliches Wachstum von 15,6 % vorhergesagt. Europa liegt bei dieser Technologie nur im Mittelfeld.

Biologische Verfahren führend, Membranbioreaktoren vielversprechend

Nanotechnologien

Eine genaue Abschätzung des Marktpotenzials dieser zukunftsweisenden Basistechnologien im Wassersektor ist schwierig. Zahlreiche Anwendungsgebiete, wie Nanosensoren, Nanofilter, Nanomembranen oder nanoskalige Materialien sind in diesem Bereich denkbar. Allgemein werden den Nanotechnologien sehr hohe Wachstumsraten zugesprochen. Bis zum Jahr 2008 könnte der weltweite Bedarf an nanoskaligen

Nanotechnologien haben große Marktpotenziale

Materialien, Geräten und Werkzeugen mehr als 28 Milliarden US-\$ betragen.⁸¹

Der Umsatz für nanotechnologische Anwendungen im Umweltbereich wird für den US-Markt auf 6,1 Milliarden US-\$ im Jahr 2010 geschätzt; die Wachstumsrate wird mit 75,2 % beziffert. Hierbei werden nanotechnologischen Verfahren zur Grundwasser- und allgemein zur Wassersanierung die höchsten Potenziale eingeräumt.⁸² Eine neuere Studie beziffert alleine den Markt von Nanotechnologien im Wasserbereich mit 1,6 Mrd. US-\$ im Jahr 2007 und 6,6 Mrd. US-\$ im Jahr 2015. Schwerpunkte hierbei liegen in der Filtration, der Entsalzung, und auch in der Desinfektion, der Dekontamination und dem Recycling.⁸³

Nanotechnologien im Wasserbereich wachsen auf 6,6 Mrd. US-\$ in 2015

Biotechnologie:

Die Biotechnologie gilt als eine Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts und ist von großer Bedeutung in der pharmazeutischen und agrochemischen Industrie. Der Einfluss der Biotechnologie auf die industriellen Produktionsverfahren der chemischen Industrie wächst, insbesondere bei der Herstellung von Feinchemikalien und der Wirkstoffherstellung für die Agro- und Pharmaindustrie.⁸⁴ Für das Jahr 2010 wird ein Wachstum auf über 300 Milliarden US-\$ von etwa 30 Milliarden US-\$ in 2001 erwartet [Hoppenheidt 2004, Festel 2004].

Der Einsatz biotechnologischer anstelle von chemischen Verfahren kann zu reduzierten Produktionskosten führen. Nachhaltigkeit, Einsparung von Rohstoffen und geringere Mengen an Abwasser sind weitere mögliche Vorteile. Besonders in der Textilbranche kann die Verwendung von Biokatalysatoren deutliche Wasser- und Energieeinsparungen bringen [Braun 2002].

Großer Einfluss der Biotechnologie auf die industrielle Produktion

Instandsetzungsmaßnahmen

Rohrleitungen und Abwasserleitungen haben nur eine begrenzte Lebensdauer – je nach Qualität, Bodenbeschaffenheit und Wartung zwischen 50 und 100 Jahren. Pro Jahr müssten 1-2 % der Leitungen erneuert werden. Da die Erneuerung in den letzten 10 Jahren vernachlässigt wurde, stehen in den kommenden Jahren hohe Investitionen für die Sanierung der Leitungsnetze in zahlreichen Ländern Europas und in den USA an. Im Jahr 2001 waren 18 % der Kanäle in den

Lebensdauer von Kanalsystemen begrenzt

⁸¹ RNCOS 2006, The world Nanotechnology Market
<http://www.nanoinfo.jp/whitepaper/WP143.pdf>

⁸² BCC Research 2006: Nanotechnology in Environmental Application

⁸³ Helmut Kaiser Consultancy 2008, Nanotechnologies in Water, Drinking Water and Waste Water worldwide

⁸⁴ http://wbt.dechema.de/img/wbt/Literatur/Chemie_Wirtschaft_05_02-2004.pdf

alten Bundesländern älter als 75 Jahre, 1997 lag der Anteil derart alter Rohre noch bei 12,5 %; einer Umfrage zufolge waren 17 % des Kanalnetzes sanierungsbedürftig [Winkler 2003]. Hierbei ist zu beachten, dass ein erheblicher Anteil auf schadhafte Anschlüsse von privaten Haushalten an das öffentliche Kanalsystem entfallen.

Das jährliche Investitionsvolumen in den entwickelten Ländern beträgt mindestens 100 Milliarden US-\$, alleine für die Erneuerung der viktorianischen Rohre in London würden 3,6 Milliarden US-\$ benötigt. Besonders alternative Verlegungstechniken, wie das Schlauch- und Langrohrrelining sind gefragt. Sie erfordern keine aufwändigen Grabungsarbeiten.

Investitionen hoch -
Alternativmethoden
gefragt

Einer Markterhebung des IKT (Institut für Unterirdische Infrastruktur) unter deutschen Netzbetreibern zum Thema „Bauinvestitionen Kanalisation“ im vierten Quartal 2007 zeigen einen deutlichen Trend zu mehr Investitionen in das veraltete Rohrsystem. Hierbei verzeichnet der Bereich Kanalneubau/-erschließung insbesondere mit offener Bauweise einen rückläufigen Trend (-11 %), wohingegen die Sanierung deutliche Zuwächse aufweist (20 %). Favorisierte Werkstoffe sind vom Rohrquerschnitt abhängig und beinhalten Kunststoffe, Steinzeug und Beton [UmweltMagazin 2008].

IKT Umfrage zeigt:
Netzbetreiber wollen
sanieren

4.2 Exportchancen für deutsche Unternehmer

Deutschland ist ein Exportland, deutsche Technologien in der Wasser- und Abwasserversorgung sind weltweit gefragt, trotz starker Konkurrenz. Große Technologiedienstleister wie Siemens Water Technologies bringen sich durch gezielte Akquisitionen in eine gute Ausgangsposition für das erwartete starke Wachstum auf dem Wassermarkt⁸⁵, der von wenigen großen Playern wie General Electric (GE), ITT und 3M dominiert wird. GE ist erst 2003 ins Wassergeschäft eingestiegen und hat sich durch eine Serie von Übernahmen (z. B. Zenon oder Ionics) auf dem Markt platziert.⁸⁶ Kleinere deutsche Spezialfirmen, wie der sächsische Spezialist DAS GmbH, haben dennoch gute Marktchancen. DAS hat einen neuen Bioreaktor vorgestellt, in dem Mikroorganismen auf kleinen Polystyrolkügelchen siedeln und das von oben nach unten rieselnde Wasser reinigen.⁸⁷

Exportchancen für
deutsche
Unternehmer gut,
Konkurrenz jedoch
hoch

⁸⁵ „Siemens will das Wassertechnikgeschäft ausbauen“ in VDI Nachrichten vom 12.05.06

⁸⁶ „GE baut auf Wasser“ in VDI Nachrichten vom 24.03.06

⁸⁷ „Sächsische Abwassertechnik hat Potenzial in Asien“ in VDI Nachrichten vom 21.07.06

Unter den Wasserversorgern weltweit (nach Kundenzahl) nimmt das deutsche Unternehmen RWE den dritten Platz hinter Veolia/Vivendi und Suez/Ondeo ein.⁸⁸

Künftige Märkte in
den Schwellenländern

Zukünftige Märkte für Wassertechnologien liegen vor allem in den Entwicklungs- und Schwellenländern Afrikas, Asiens und Südamerikas, in denen bis heute eine völlig unzureichende Versorgungs- und Entsorgungssituation besteht. Dezentrale und kostengünstige Systeme zur Wasserver- und -entsorgung sind gefragt. Auch in den Mittelmeerländern, die von zunehmenden Dürren und Wasserknappheiten geplagt werden, besteht kurz- bis mittelfristig ein hoher Bedarf an Hightech-Lösungen zur nachhaltigen Bewirtschaftung der Wasserressourcen. In einem Verbundprojekt zur exportorientierten Forschung auf dem Gebiet der Wasserver- und -entsorgung sind moderne deutsche Technologien hinsichtlich ihrer Eignung und Verwendbarkeit an ausländischen Standorten unter teils extremen Bedingungen untersucht worden.⁸⁹

Im asiatischen Raum:
Indien und China

Im asiatischen Raum haben vor allem China und Indien aufgrund wachsender Bevölkerungszahlen und rasch expandierender Wirtschaften mit Wasserproblemen zu kämpfen.

In **Indien** besitzt fast keine Stadt eine Kläranlage, und die wenigsten klein- und mittelständischen Industrien reinigen ihre Abwässer. Die Gewässer sind daher großflächig verseucht. Die Grundwasserpegel in 206 von 593 Distrikten sind stark gefallen, vielerorts droht eine Versalzung.

Ganges in Indien
stark verseucht

Der Ganges, einer der wichtigsten Flüsse des Landes, ist mit Schwermetallen, zahlreichen Mikroorganismen und einer sehr hohen organischen Fracht belastet. Der Fluss dient jährlich mehr als 45.000 verbrannten oder unverbrannten Leichnamen als Transportmedium zum Meer; seit Mitte der 1980er Jahre überschreitet der Ganges die Grenze des ökologisch und hygienisch vertretbaren. Auch der Yamuna-Fluss in der Hauptstadt Neu-Delhi gilt als zu stark belastet, um daraus Trinkwasser zu gewinnen; die Stadt bezieht ihr Wasser aus 100 Kilometer Entfernung. Wasser kostet nichts, was zu einem sorglosen und achtlosen Umgang verführt. Klassische Wassermanagement-Systeme fehlen fast vollständig; der Umsatz mit Trinkwasser in Flaschen ist stark gewachsen.

⁸⁸ Wird Wasser bald so teuer wie Öl?, Wirtschaftswoche vom 21.7.2008, <http://www.wiwo.de/technik/wird-wasser-bald-so-teuer-wie-oel-300969/>

⁸⁹Die Ergebnisse der zwei Teilprojekte „Trinkwasser“ sowie „Abwasserbehandlung und Wasserwiederverwendung“ können beim Technologiezentrum Wasser bestellt werden. (<http://www.tzw.de/>).

Die **VR China** ist im rapiden Wachstum begriffen – bei gleich bleibendem Wasserdargebot. Das Land ist wasserarm, gemessen an der hohen Bevölkerungszahl. In mehr als 100 Städten herrscht akuter Wassermangel, die Hauptstadt Beijing leidet seit sieben Jahren in Folge an Dürre.⁹⁰ Die Gewässer sind, wie in vielen Schwellenländern, hoch belastet, u. a. weil nur 46 % der Abwässer geklärt werden. Chinas Gewässer werden jährlich mit 40-60 Milliarden Tonnen Abwasser belastet. Rund 30 % der Flüsse werden von der Regierung als so dreckig eingestuft, dass das Wasser weder für die Landwirtschaft noch die Industrie unbehandelt nutzbar ist.

China ist wasserarm und leidet unter Dürren

Das Kanalnetz ist trotz großer Investitionen in den letzten Jahrzehnten noch ungenügend ausgebaut, und vor allem in den Städten können die Sanierung und die Neuverlegung nicht mit dem steigenden Lebensniveau mithalten. Die chinesische Regierung hat das Thema Umwelt für sich entdeckt und auf der Prioritätenliste sehr hoch angesetzt [Holtmannspötter 2006]. Auch einzelne Provinzen, wie z. B. Wuxi haben erkannt, dass der Bau von Kläranlagen Umweltkatastrophen vorbeugen kann. In diesem konkreten Fall war es zu einer Algenseuche durch Abwässer im nahegelegenen See Taihu gekommen, der auch der Trinkwasserversorgung dient.⁹¹

China hat das Thema Umwelt entdeckt - nach etlichen Umweltkatastrophen

Die geplanten staatlichen Investitionen in den kommenden Jahren sind erheblich. Bis 2010 sollen etwa 30 Milliarden Euro in die Sanierung der Wasserver- und -entsorgungs-Strukturen investiert werden⁹² und einer Million chinesischen Bauern, deren Trinkwasser mit Arsen, Salzen und anderen Stoffen verseucht ist, Zugang zu sauberem Trinkwasser ermöglicht werden. Weiterhin will China in den kommenden fünf Jahren 175 Milliarden US-\$ in Projekte zum Umweltschutz investieren⁹³, u. a. in den Bau von zehn Großkläranlagen.

Investitionen in Milliardenhöhe, u. a. für den Bau von Kläranlagen

Deutsche Technik ist in China gefragt, in vielen chinesischen Städten wurden deutsche Kläranlagen gebaut. Auch auf der Ifat, der internationalen Fachmesse für Umwelt und Entsorgung zeigt sich das große Interesse chinesischer Unternehmen an deutschen Technologien anhand zahlreicher chinesischer Besucher. Das BMBF fördert den Ausbau der Wissenschaftlich-Technologischen Zusammenarbeit mit China bis 2011 und ein Schwerpunkt ist der Umweltschutz, insbesondere Wassertechnologien und Wassermanagement⁹⁴

Deutsche Technik in China beliebt

⁹⁰ „Chinas Wasserwirtschaft bietet gute Chancen für deutsches Know-how“ in VDI Nachrichten vom 28.07.2006

⁹¹ „Wastewater War“, Wuxi is sparing little expense in its sewage treatment efforts, in China Business, 24.3.2008, Volume 23, No 357.

⁹² „China korrigiert Vergabe von Fördermitteln für Kläranlagen“, bfai , 7.4.2008

⁹³ http://www.innovations-report.de/html/berichte/umwelt_naturschutz/bericht-67939.html

⁹⁴ <http://www.bmbf.de/foerderungen/12792.php>

Der Markt wächst rasant, und Experten gehen von anhaltend hohen Wachstumsraten im zweistelligen Bereich in der Wasserwirtschaft aus. Die Bereiche Kanalisation, Abwasserbehandlung, Wasseraufbereitung, Klärschlamm Entsorgung und Umweltmesstechnik werden als gewinnträchtig eingestuft. Membranverfahren zur Filtration und UV-Bestrahlung zur Desinfektion sind ebenfalls gefragt.

Gute Chancen werden auch für moderne Bewässerungssysteme in ländlichen Gebieten gesehen, denn die traditionelle Bewässerung, das Fluten von Feldern, ist sehr wasserintensiv. Auf dem Land bieten sich dezentrale Lösungen zur Abwasserreinigung an.

5 AUSBLICK

Das Thema Wasserknappheit & Technologie ist von grundlegender Bedeutung – heute und vor allem auch in der Zukunft. Vielfältige Ursachen – Verschmutzung der Gewässer, Bevölkerungswachstum, anthropogene Eingriffe etc. – führen zu einer Wasserverknappung, die nicht nur klassische aride oder semiaride Länder in Afrika und dem Nahen Osten betreffen, sondern auch Staaten wie Großbritannien und Polen.

Wasserknappheit & Technologie von zentraler weltweiter Bedeutung

Zu den zentralen Herausforderungen der Menschheit zählen daher: die nachhaltige Versorgung der Weltbevölkerung mit Trink- und Brauchwasser, die Reduktion der Gewässerverschmutzung und die Sicherung der Wasserkreisläufe. Hierdurch lassen sich auch weitere Problemfelder wie Energie, Armut, Hunger, Krankheiten etc. mildern.

Innovative Technologien können dabei einen entscheidenden Beitrag zur Lösung dieser Herausforderungen leisten. Zentrale Ansatzpunkte sind dabei die Minimierung des Wasserverbrauchs, die Maximierung der Wasserverfügbarkeit sowie Technologien zur Wasseraufbereitung bzw. -gewinnung. Schlüsseltechnologien wie Membranverfahren, Nanotechnologien und die Biotechnologie spielen hier eine bedeutende Rolle. Neben diesen stellen jedoch auch weniger (hoch)technologieintensive Verfahren mögliche Ansatzpunkte dar – beispielsweise die Nutzung von Grauwasser. Die Entsalzung von Meerwasser zur Sicherung der Trinkwasserversorgung ist hingegen gerade für die Länder eine hoffnungsvolle Option, bei denen sowohl Meerwasser als auch Sonnenenergie in großer Menge verfügbar sind.

Technologien können bei der Bewältigung der Herausforderungen helfen

Eine große Unwägbarkeit bei der zukünftigen Wasserverfügbarkeit liegt in der Entwicklung der Klima- und Energieproblematik. Weitgehende Einigkeit besteht darin, dass eine weitere globale Erwärmung stark veränderte lokale klimatische Bedingungen zur Folge haben kann, die wiederum ungeahnte Auswirkungen auf den regionalen Wasserhaushalt haben wird. Der ungebremste weltweite Energiehunger belastet die Wasserressourcen zusätzlich.

Entwicklung der Klimaproblematik heute schwer abschätzbar

Zusammenfassend gilt, dass eine weltweite Versorgungssicherheit mit sauberem Trinkwasser langfristig nur durch einen nachhaltigen und intelligenten Umgang mit der Ressource Wasser gelingen kann.

Nachhaltiger Umgang mit der Ressource Wasser nötig

GLOSSAR UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

| | |
|-----------------|---|
| Abwasser | Verwendetes Wasser von unterschiedlicher Güte, welches in Industrie, Landwirtschaft und Privathaushalt anfällt und mit unterschiedlichen Stoffen während des Gebrauchs belastet wird. Es wird in die Kanalisation, in oberirdische Gewässer oder ins Grundwasser eingeleitet. |
| Betriebswasser | Als Betriebswasser (Brauchwasser, Nutzwasser) wird Wasser bezeichnet, das für technische, gewerbliche oder landwirtschaftliche Anwendungen dient und keine Trinkwasserqualität hat. Es kann aus Regenwasser, Oberflächenwasser, Grauwasser oder recyceltem Abwasser bestehen. |
| Braunwasser | Schwarzwasser, das weder Urin noch Fäkalien enthält. |
| BVT/BREF | Beste-Verfügbare-Technik-(BVT) Merkblätter (engl. Best Available Reference Documents (BREF)). Die Merkblätter zeigen die effizientesten und fortschrittlichsten Technologien für die Inbetriebnahme und das Betreiben umweltrelevanter Industrieanlagen auf. Die europäische Richtlinie über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IUV) (engl. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC)) fordert die Anwendung der besten verfügbaren Techniken in Neuanlagen und ab 2007 auch in bestehenden Anlagen. |
| GaN-Leuchtdiode | Ein elektronisches Bauelement, das auf Halbleitertechnologien basiert; das verwendete Material ist Galliumnitrid (GaN). Durchfließt Strom die Leuchtdiode, so strahlt sie blaues, grünes oder UV-Licht ab. |
| Gelbwasser | Sammelbegriff für Urin aus Separationstoiletten und Urinalen, unverdünnt oder mit Spülwasser. |

| | |
|---|---|
| Grauwasser | Der Abfluss von Bade- und Duschwassern sowie ggf. auch von Waschtisch und Waschmaschine wird als Grauwasser bezeichnet. Es ist minder verschmutzt und fäkalienfrei. |
| H ₂ O ₂ /Wasserstoffperoxid | Wasserstoffperoxid ist eine klare Flüssigkeit. Es ist sehr reaktiv und wird zur Abtötung pathogener Keime oder der Oxidation von Schadstoffen in Wasser verwendet. |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change; stellt die weltweit höchste Autorität zu klimawissenschaftlichen Fragen dar. Renommiertere Wissenschaftler werden von den einzelnen Staaten benannt und erarbeiten Berichte, die in einem mehrstufigen Begutachtungs-Prozess unter Einbezug von Wissenschaft und Politik diskutiert werden. |
| Nachhaltigkeit | Eine Entwicklung, die den Bedürfnissen der Gegenwart gerecht wird, ohne die Befriedigung der Bedürfnisse künftiger Generationen zu beeinträchtigen. |
| Nanotechnologie | Nanotechnologie beschreibt die Herstellung, Untersuchung und Anwendung von Strukturen, molekularen Materialien, inneren Grenz- und Oberflächen mit mindestens einer kritischen Dimension oder mit Fertigungstoleranzen (typischerweise) unterhalb von 100 Nanometern. Entscheidend ist dabei, dass allein aus der Nanoskaligkeit der Systemkomponenten neue Funktionalitäten und Eigenschaften zur Verbesserung bestehender oder Entwicklung neuer Produkte und Anwendungsoptionen resultieren. Diese neuen Effekte und Möglichkeiten sind überwiegend im Verhältnis von Oberflächen- zu Volumenatomen und im quantenmechanischen Verhalten der Materiebausteine begründet. |
| O ₃ /Ozon | Ozon ist gasförmig und besteht aus drei Sauerstoffatomen. Es ist hoch reaktiv und wird zur Wasserdesinfektion und Oxidation |

| | |
|--------------------------|--|
| | von Schadstoffen im Wasser verwendet (Ozonung). |
| Recycling | Die Rückführung der durch die Produktion und den Verbrauch von Gütern entstehenden Abfälle in den Stoffkreislauf durch Verwertung. |
| Schwarzwasser | Die Sanitärabflüsse der Toiletten (Urin, Spülwasser und Fäkalien) werden als Schwarzwasser bezeichnet. |
| Trinkwasser | Wasser, das für den menschlichen Genuss geeignet ist. Die Anforderungen an Trinkwasser werden durch Richtlinien der jeweiligen Länder geregelt. |
| UV-Strahlung | Elektromagnetische Strahlung kurzer Wellenlänge von 10 bis 380 nm. Oft auch als UV-Licht bezeichnet, obwohl UV-Strahlung für den Menschen nicht sichtbar ist. Sie dient der Keimabtötung. |
| WWF | World Wildlife Fund – Internationale Organisation, die sich für den Erhalt von natürlichen Habitaten und ein harmonischeres Zusammenleben zwischen Mensch und Natur einsetzt. |
| World Commission on Dams | Weltkommission für Staudämme ist eine von einer Vielzahl von Staaten, privaten Gruppen und finanziellen Einrichtungen getragene Kommission zur Untersuchung der Wirksamkeit von Großstaudammprojekten. |

ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Bevölkerung (in tausend) mit (rot) und ohne (blau) Wasserstress. (Quelle: [UNESCO 2006])..... | 14 |
| Abbildung 2: Wasserverteilung auf der Erde. (Quelle: VDI-ZTC-Darstellung nach [BMZ 2005]) | 15 |
| Abbildung 3: Unterschiede hydrologisch bedingter Wasserknappheit (rot, Evapotranspiration größer als Niederschlagsmenge) oder -überangebot (blau). (Quelle: [Falkenmark 2005]). | 16 |
| Abbildung 4: Verteilung der mittleren jährlichen Niederschläge [mm] im Zeitraum 1961-1990 in Deutschland. (Quelle: Bernhard Mühr, Institut für Klimaforschung und Meteorologie, Universität Karlsruhe)..... | 17 |
| Abbildung 5: Anteil der Landwirtschaft an der Wasserentnahme des jeweiligen Landes. (Quelle: [WRI 2000])..... | 18 |
| Abbildung 6: Weltweiter Wasserverbrauch in der Landwirtschaft, der Industrie und den Privathaushalten für die Jahre 1990 bis 2025. (Quelle: [BMZ 2005])..... | 19 |
| Abbildung 7: Wassernutzung im deutschen Haushalt (2001). (Quelle: Bundesverband der Energie- und Wasserversorgung e. V.)..... | 19 |
| Abbildung 8: Wasserverbrauch im Verhältnis zum natürlichen, lokalen Dargebot. Rot gibt einen deutlich größeren Wasserverbrauch wieder als lokal verfügbar, grün steht für einen adäquaten Verbrauch. (Quelle: [UNESCO 2006])..... | 21 |
| Abbildung 9: Mögliche menschliche Quellen für eine Grundwasserverschmutzung. (Quelle: [UNESCO 2006])..... | 23 |
| Abbildung 10: Nachgewiesene organische Reststoffe in Gewässern der USA. Hintere Balken: Anzahl der Stoffe, vorderer Balken: Anteil an der Schadstoffmenge. (Quelle: [Schröder 2003])..... | 25 |
| Abbildung 11: South Cascade Glacier in den Washington Cascade Mountains, in den Jahren 1928, 1979 und 2000. (Quelle: National Snow and Ice Data Center)..... | 29 |
| Abbildung 12: Mögliche Wasserknappheiten im Jahr 2025; unterteilt nach Ursachen: ökonomisch bedingt (gelb), physikalisch bedingt (rot) und keine oder nur geringe Wasserknappheit (blau). (Quelle: [Penning de Vries 2003])..... | 30 |
| Abbildung 13: Einsparungspotenzial des Trinkwasserverbrauchs durch die Verwendung von Regenwasser. (Quelle [UBA 2005])..... | 44 |
| Abbildung 14: Beispiel eines Schlauchrelinings mit einem Glasfasergewebeschauch. (Quelle: Ludwig Peiffer)..... | 46 |
| Abbildung 15: Tropfbewässerung im Kartoffelanbau. (Quelle: Netafim TM)..... | 48 |
| Abbildung 16: Getreideanbau in Trockengebieten in Jordanien. (Quelle: Satellitenaufnahme aus Google Earth)..... | 51 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 17: NoMix Toilette. (Quelle: EAWAG) | 54 |
| Abbildung 18: Mulden-Rigolen-System zur Versickerung von Grundwasser in einem Wohngebiet; schematische Darstellung. (Quelle: Stadt Münster, Tiefbauamt) | 60 |
| Abbildung 19: Reales Beispiel eines Versickerungs-Systems. (Quelle: [UBA 2005])..... | 60 |
| Abbildung 20: Exemplarische Grauwasseraufbereitungsanlage. (Quelle: GEP-Umwelttechnik GmbH)..... | 63 |
| Abbildung 21: Beispielhaftes Fließschema einer Abwasserreinigungsanlage nach dem Belebungsverfahren. (Quelle: Wikipedia)..... | 69 |
| Abbildung 22: Trenngrößen, Molekulargewicht und Druck für die verschiedenen Trennverfahren (eigene Darstellung). | 73 |
| Abbildung 23: Kopplung von solarthermischem Kraftwerk (links) mit einer Meerwasserentsalzung (rechts). (Quelle: VDIIVDEIIT) | 82 |
| | |
| Tabelle 1: Grenzen für Wasserknappheit und Wassermangel..... | 13 |
| Tabelle 2: Einige Schadstoffe mit den dazugehörigen Behandlungsmethoden. (Quelle: [BVT 2003b]) | 72 |
| Tabelle 3: Trennverfahren und dazugehörige Membrantypen, Teilchenart und Beispielanwendung | 74 |

LITERATURVERZEICHNIS

- [Anan 2006] Anan, J. D., Hargreaves, J. C., Using multiple observationally-based constraints to estimate climate sensitivity, *Geophys. Res. Letters*, Vol. 33, 2006.
- [BACAS 2004] Royal Belgian Academy Council of Applied Science, Industrial Biotechnology and Sustainable Chemistry, 2004.
- [Baur 2001] Baur, J., Mehr Nutzen aus dem Staudamm-Großprojekten?, *Aus Politik und Zeitgeschichte*, B48-49, 2001.
- [BFG 2005] Forschung und Entwicklung, Ergänzung zum Jahresbericht 2004/2005, Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.), 2005.
- [Blasshofer 2002] Blasshofer, T., Wasser als Ursache und Mittel internationaler Konflikte, Das Beispiel Euphrat-Tigris-Becken, Diplom Arbeit an der Universität Frankfurt, 2002.
- [Braun 2002] Braun, A., et al. The Assessment of Future Environmental and Economic Impacts of Process-Integrated Biocatalysts, Hrsg.: Institute for Prospective Technological Studies (IPTS), Report EUR 20407 EN, Julie 2002.
- [Brown 2008] L. R. Brown, Draining our Future: The growing shortage of Freshwater, *The Futurist*, May-June, 2008.
- [Brunn 1998] Brunn, K., Jansen, R., Preikschat, P., Abwasserfreie Abkochentfettung, *Galvanotechnik*, 89, Nr. 4, S. 1119, 1998.
- [BMU 2006a] Wasserwirtschaft in Deutschland Teil 1 - Grundlagen, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin (Hrsg.), 2006.
- [BMU 2006b] Wasserwirtschaft in Deutschland Teil 2 - Gewässergüte, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin (Hrsg.), 2006.
- [BMU 2006c] UNSER WASSER Lebensmittel - Rohstoff - Kulturgut., Broschüre, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin (Hrsg.), 2006.
- [BMU 2006d] Unser Wasser Lebensmittel - Rohstoff - Kulturgut, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin (Hrsg.), 2006.
- [BMZ 2005] Weltwassertag, Wasser für alle. Die Wasserkrise als Herausforderung für die Wissenschaft, Pressemappe, Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Hrsg.), 2005.
- [BVT 2001] Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU), Referenzdokument über die Besten Verfügbaren Techniken in der Zellstoff- und Papierindustrie. Europäische Kommission (Hrsg.), dt. Übersetzung durch das Umweltbundesamt, 2001.
- [BVT 2003a] Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU), Referenzdokument über die besten verfügbaren Techniken in der Textilindustrie. Europäische

- Kommission (Hrsg.), dt. Übersetzung durch das Umweltbundesamt, 2003.
- [BVT 2003b] Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU), BVT-Merkblatt zu Abwasser- und Abgasbehandlung/-management in der chemischen Industrie. Europäische Kommission (Hrsg.), dt. Übersetzung durch das Umweltbundesamt, 2003.
- [BREF 2005a] Integrated Pollution Prevention and Control - Reference Document on Best Available Techniques for the Manufacture of Organic Fine Chemicals, Europäische Kommission (Hrsg.), 2005.
- [BREF 2005b] Integrated Pollution Prevention and Control - Reference Document on Best Available Techniques for the Manufacture of Surface Treatment of Metals, Europäische Kommission (Hrsg.), 2005.
- [Cao 2005] J. Cao, D. Elliott, W. Zhang, Perchlorate Reduction by Nanoscale Iron Particles, *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 7, Nos. 4-5, 2005.
- [CMHC 2002] Final Assessment of Conservation Co-op's Greywater System, Research Highlights, Technical Series, 02-100, Canada Mortgage and Housing Corporation, 2002.
- [Dahmen 2001] Dahmen, N., Piotter, F., Hierl, F., Roelse, M., Überkritische Fluide zur Behandlung und Herstellung komplexer Werkstoffe und Oberflächenstrukturen, Abschlussbericht zur wissenschaftlichen Verbundforschung im Rahmen der „Zukunftsoffensive Junge Generation des Landes Baden-Württemberg“, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2001.
- [DECHEMA 2006] Positionspapier des DECHEMA Arbeitskreises „Alternative Lösungsmittelsysteme für technische Anwendungen“, April 2006.
- [Dohmann 2006] Dohmann, M., Sauber gefiltert, in der Frankfurter Allgemeine Zeitung vom 22.3.2006.
- [Doll 2005] Doll, T.E., Abbt-Braun, G., Frimmel, F.H., Oxidative Aufbereitung von Rohwasser mit hoher DOM Belastung, Exportorientierte F&E auf dem Gebiet der Wasserver- und -entsorgung Teil I: Trinkwasser Band 2: Leitfaden, Eigenverlag DVGW-Technologiezentrum Wasser Karlsruhe, 2005.
- [Düx 2000] Düx, P., Eickenbusch, E., Von der Kavitation zur Sonotechnologie, Technologieanalyse, VDI Technologiezentrum (Hrsg.), ISSN 1436-5928, 2000.
- [Erickson 2002] Erickson, B. E., Analyzing the Ignored Environmental Contaminants. *Environ. Sci. Technol.* 36, 140A-145A. 2002.
- [EPA 2005] Proceedings - Nanotechnology and the Environment: Applications and Implications Progress Review Workshop III, October 26-28, 2005, Arlington, U.S. Environmental Protection Agency (Hrsg.).
- [Falkenmark 2005] Falkenmark, M., Rockström, J. Rain: The Neglected Resource. Swedish Water House Policy Brief Nr. 2. SIWI, 2005. Quelle hier: SIWI various sources.

-
- [Fenwick 2006] Fenwick, A., Waterborne Infectious Diseases – Could They be Consigned to History? *Science*, Vol 313, 25.August 2006.
- [Festel 2004] Festel, G., The Impact of Lifesciences on the Chemical Industry, *Chemie & Wirtschaft - Jahrgang 3, Ausgabe 2*, Vereinigung Chemie und Wirtschaft & Gesellschaft Deutscher Chemiker (Hrsg.), Mai 2004.
- [Frid 2003] Frid, C., Hammer, C., Law, R., Loeng, H., Pawlak, F.P., Reid, P.C., Tasker, M., Environmental Status of the European Sea, Internationaler Rat für Meeresforschung, 2003
- [Fröhlich 2006] Fröhlich, C., Zur Rolle der Ressource Wasser in Konflikten, *APuZ, Aus Politik und Zeitgeschichte*, Beilage zur Wochenzeitung *Das Parlament*, 25/2006.
- [Gaisser 2002] Gaisser, S., Hoogeveen, R., Hüsing, B., Überblick über den Stand der Wissenschaft und Technik im produktionsintegrierten Umweltschutz durch Biotechnologie (PIUS-BT), Fraunhofer ISI 2002.
- [GDNP 2006] Overview and Comparison of Conventional Water Treatment Technologies and Nano-Based treatment Technologies, *Global Dialogue on Nanotechnology and the Poor: Opportunities and Risks*. Meridian Institute (Hrsg.), 2006.
- [Giese 2002] Giese, E., Wasserverknappung, Wassernutzungskonflikte und Wassermanagement in Trockengebieten Zentralasiens, *Spiegel der Forschung*, 19Jrg./Nr. 1, Juli 2002.
- [Gilbert 2005] Gilbert, E., Heinle, M., Schlussbericht, Elimination von xenobiotischen Stoffen in Gegenwart von natürlichen Wasserinhaltsstoffen, Exportorientierte F&E auf dem Gebiet der Wasserver- und -entsorgung Teil I: Trinkwasser Band 2: Leitfaden, Eigenverlag DVGW-Technologiezentrum Wasser Karlsruhe, 2005.
- [Geyer 2006] Geyer, R., Gorsboth, M., Wasser für alle ?!, Bundeszentrale für politische Bildung, Nr. 52, ISSN 0944-8357, 2006.
- [Grimm 2007] Bachmann, G., Grimm, V., Hoffknecht, A., Luther, W., Ploetz, C., Reuscher, G., Teichert, O., Zweck, A., Nanotechnologien für den Umweltschutz, Bd. 71 *Zukünftige Technologien Consulting* (Hrsg.), 2007.
- [Grobosch 2003] Grobosch, M., Grundwasser und Nachhaltigkeit - Zur Allokation von Wasser über Märkte, Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades, Eberhard-Karls-Universität Tübingen, 2003.
- [Guru 2000] Guru, M.V., Horne, J.E., The Ogallala Aquifer, The Kerr Center for Sustainable Agriculture Inc. (Hrsg.), 2000.
- [Heuer 2005] Heuer, S., Exergian, A., Ozeane auf Entziehungskur, Fokus Wasser für die Welt, *MIT Technology Review*, August 2005.
- [Hinrichsen 2003] Hinrichsen, D., A Human Thirst, *World Watch Magazine*, January/Ferbruary 2003.
- [Hobby 2004] Hobby, K., Hagen, K., Czekalla, C., Membranverfahren in der Schwimmbadwasseraufbereitung, Vortrag im Rahmen der 2. Membrantage 22.-24. Juni 2004 in Kassel.

- [Hoff 2006] Hoff, H., Kundzewicz, Z. W., Süßwasservorräte und Klimawechsel, APuZ, Aus Politik und Zeitgeschichte, Beilage zur Wochenzeitung Das Parlament, 25/2006, 19. Juni 2006.
- [Holtmannspötter 2006] Holtmannspötter, D., Rijkers-Defrasne, S., Glauner, C., Korte, S., Zweck, A., Übersichtsstudie: Aktuelle Technologieprognosen im internationalen Vergleich, Zukünftige Technologien Consulting (Hrsg.), Juni 2006.
- [Hoppenheidt 2004] Hoppenheidt, K., Peche, R., Tronecker, D., Roth, U., Hottenroth, S., Entlastungseffekte für die Umwelt durch Substitution konventioneller chemisch-technischer Prozesse und Produkte durch biotechnologische Verfahren - vergleichende Analyse, Abschlussbericht zum UFOPLANB-Vorhaben 202 66 326, Augsburg, 2004.
- [Horlemann 2006] Horlemann, L., Neubert, S., Virtueller Wasserhandel zur Überwindung der Wasserkrise?, APuZ Aus Politik und Zeitgeschichte, Beilage zur Wochenzeitung und Das Parlament, 25/2006.
- [Hu 2006] Hu, H., Dai, M., Yao, J., Xiao, B., Li, X., Zhang, Q., Xiong, L., Overexpressing a NAM, ATAF and CUC (NAC) transcription factor enhances drought resistance and salt tolerance in rice., PNAS, August 2006.
- [Ilgen 2006] Ilgen, K., Haldenwang, L., Rieselnd Abwasser reinigen, Umwelt Magazin, 6, 2006, Springer Verlag.
- [IPCC 2007] Climate Change 2007 - The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC.
- [Jaffe 2004] Jaffe, S., Facing the Global Water Crisis, *The Scientist* 2004, 18(9):18.
- [Kehse 2005] Kehse, U., Globale Erwärmung gibt Hurrikans mehr Kraft, Das M.I.T. Magazin für Innovation, Technology Review, 16.9.2005.
- [Klaphake 2001] Klaphake, A., Scheumann, W., Politische Antworten auf die globale Wasserkrise: Trends und Konflikte, Aus Politik und Zeitgeschichte, B48-49, 2001.
- [Kohring 2001] Kohring, B., Kultivierung von Bodenbakterien der Spezies *Sinorhizobium meliloti* und die Aufarbeitung ihrer Signalmoleküle, Dissertation, Technische Universität Bielefeld, 2001.
- [Kowalczyk 2004] Kowalczyk, W. Simulation von Fest-Flüssig-Phasenübergängen bei der Hochdruckbehandlung, Dissertation, Lehrstuhl für Fluidmechanik und Prozessautomation der Technischen Universität München, 2004.
- [Pinnekamp 2003] Pinnekamp, J., Metzger, J.W., Kuch, B., Schneider, C., Schrader., Untersuchung der Abwasserreinigung zur Eliminierung von organischen Spurstoffen unter verfahrenstechnischen und ökonomischen Aspekten. Literaturstudie, Universität Stuttgart, 2003.
- [Koopmann 2006] Koopman, B., Heany, J.P., Cakir, F.Y., Rembold, M., Indeglia, P., Kini, G., Ocean Fallout Study, Final Report, prepared for Florida Department of Environmental Protection, 2006.

-
- [Kösters 2006] Kösters H., Mechanotronic solutions in dry running vacuum pumps, *Vacuum's Best, Special Issue: Vacuum in Research and Practice*, 2006.
- [Kürschner-Pelkmann 2006] Kürschner-Pelkmann, F., Der Traum vom schnellen Wasser-Geld, *APuZ Aus Politik und Zeitgeschichte, Beilage zur Wochenzeitung Das Parlament*, 25/2006.
- [Laimé 2005] Laimé, M., Rückschläge für das französische Modell, *Le Monde diplomatique* Nr. 7612, 2005.
- [Lassarre 2001] Lassarre, F., Rekacevicz, P. Quellen, Pipelines, Grenzkonflikte und Wasserrechte, *Le Monde diplomatique* Nr. 7612, 2005.
- [Leininger 2006] Leininger, S., Urich, T., Schloter, M., Schwark, L., Qi, L., Nicol, G.W., Prosser, J.I., Schuster, S.C., Schleger, C., Archae predominate among ammonia-oxidizing prokaryotes in soil, *Nature*, Vol. 442, 806-809, 17. August 2006.
- [Long 2001] Long, R. Q., Yang, R. T., Carbon nanotubes as superior sorbent for dioxin removal, *J. Am Chem Soc.*, 7; 123(9):2058-9, 2001.
- [Nahrein 2006] Nahrein, S. Der Irrglaube vom Wasser im Überfluss, *Zeitschrift für Entwicklung und Zusammenarbeit*, 03/2006.
- [McDowall 2005] McDowall, L., Degradation of Toxic Chemicals by Zero-Valent Metal Nanoparticles - A Literature Review, Human Protection and Performance Division, Defence Science and Technology Organisation (DSTO), Australia (Hrsg.), 2005.
- [Melin 2003] Melin, T., Rautenbach R., *Membranverfahren. Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung*, Springer Verlag, ISBN:3540000712, 2003.
- [Müller-Holst 2002] Müller-Holst, H., *Mehrfacheffekt-Feuchtluftdestillation bei Umgebungsdruck - Verfahrensoptimierung und Anwendungen*, Dissertation, Technische Universität München, 2002.
- [Müncher Rück 2006] Münchner Rück Topics 1/2006, S. 13.
- [Nitsch 2004] Nitsch, J., Krewitt, W., Nast, M., Viebahn, P., *Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland, Kurzfassung, Forschungsvorhaben im Auftrag des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, FKZ 901 41 803*, Stuttgart, Wuppertal, Heidelberg, 2004.
- [Peng 2005] X. Peng, Z. Luan, J. Ding, Z. Di, Y. Li, B. Tian, Ceria nanoparticles supported on carbon nanotubes for the removal of arsenate from water, *Materials letters*, Vol. 59, No.4, pp. 399-403, 2005.
- [Penning de Vries 2003] Penning de Vries, F.W.T., Acquay H., Molden, D., Scherr, S. J., Valentin; C., Cofie, O., *Integrated land and water management for food and environment security. Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture Research Report 1*. Colombo, Sri Lanka: Comprehensive Assessment Secretariat, 2003.
- [Pala 2006] Pala, C., Once a Terminal Case, the North Aral Sea Shows New Signs of Life, *Science*, Vol. 312, S. 183, 14. April 2006.

- [Ploetz 2002] Ploetz, C. und Schindel, K. (2002): Forschung für nachhaltiges Wirtschaften. Lösungswege für die Praxis. Broschüre des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (Hrsg.), Bonn.
- [PoF 2005] Elemente des Lebens - Reinheit als höchstes Gebot, Pictures of the Future, Siemens AG (Hrsg.), Frühjahr 2005.
- [Power 2008] Power, M., Peak Water, Wired, May 2008.
- [OECD 1998] Biotechnology for clean industrial Products and Processes, Towards Industrial Sustainability, OECD (Hrsg.), 1998.
- [OECD 2001] The Application of Biotechnology to Industrial Sustainability, OECD (Hrsg.), 2001.
- [OcCC 2002] Organe consultatif sur les changements climatique, Das Klima ändert sich - auch in der Schweiz. Die wichtigsten Ergebnisse des dritten Wissensstandsberichts des IPCC aus der Sicht der Schweiz, 2002.
- [Okun 2000] Okun, D. A., Water Reclamation and Unrestricted Nonpotable Reuse: A new Tool for urban Water Management, Annual Review of Public Health, Vol. 21:223-245, 2000.
- [Radcliffe 2004] Radcliff, J. C., Water Recycling in Australia, Australian Academy of Technological Sciences and Engineering (Hrsg.), ISBN 1875618805, 2004.
- [Richter 2005] Fokus Wasser für die Welt, Technology Review, August 2005.
- [Rijsberman 2006] Rijsberman F. R., Manning, N., Beyond More Crop Per Drop, Water Management for Food and the Environment, 4th World Water Forum 16-22 March, 2006, Mexico.
- [Risbud 2006] Risbud, A., Cheap Drinking Water from the Ocean, Technology Review, 2006.
- [Rothstein 2003] Rothstein, B., Ploetz, C., Hoffknecht, A. und Zweck, A.: Übernutzung der Natur durch einen steigenden globalen Rohstoff- und Energiebedarf. Studie im Auftrag des VDI. Düsseldorf. 2003.
- [Rudolph 2001] Rudolph, K.-U., Block, T., Der Wassersektor in Deutschland, UBA, 2001.
- [Sachs 2006] Sachs, W., Tilman, S., Wie viel Wasser für wen? Le Monde diplomatique Nr. 7612, 2005.
- [SAM 2006] SAM Studie, Susta - Kostabres Nass, Investitionschancen im Wassersektor, sustainable asset management (SAM) (Hrsg.), Januar 2006.
- [Science 2006] Desalination Freshens Up, News, Science, Vol. 313, S. 1088, 2006.
- [Schlüter 2003] Schlüter, O., Impact of High Pressure - Low Temperature Processes on Cellular Materials Related to Foods, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2003.
- [Schreiber 2005] Schreiber, B., Schmalz, V., Worch, E., Entfernung des DOC und ausgewählter anthropogener Spurenstoffe aus Oberflächenwässern durch Aktivkohleadsorption unter besonderer Berücksichtigung extremer Temperaturbedingungen und Belastungsschwankungen sowie des Belastungsniveaus,

- Exportorientierte F&E auf dem Gebiet der Wasserver- und -entsorgung Teil I: Trinkwasser, Band 2: Leitfaden, ISBN 3-00-015478-7.
- [Schröder 2003] Schröder, H. F., Wasseraufbereitung - im Roh- und Abwasser. Vortrag im Rahmen des Seminars „Wasser - Reservoir des Lebens“ Aktuelle Fragen zu Wasserversorgung und -hygiene, Fachinformationsdienst Lebenswissenschaften, Umwelt und Gesundheit (FLUGS), Nürnberg, 2003.
- [Schmitt 2003] Schmitt, B., Nachhaltige Sanitärkonzepte und deren Anwendungsmöglichkeiten in Luxemburg - Fallstudie Neubausiedlung Nonnewisen in Esch-Alzette., Diplomarbeit, Universität Koblenz-Landau, 2003.
- [Scholl 2006] Scholl, S. S., Johnson, J. K., Making High-Flux Membranes with Carbon Nanotubes, *Science*, Vol 312, 19. May 2006.
- [Sieweke 2008] Sieweke, W. Sanierung von Großprofilen, *Umwelt Magazin*, März 2008.
- [Tratnyek 2006] Tratnyek P. C., Johnson, R., Nanotechnologies for the environmental cleanup, *nanotoday*, Volume 1, Number 2, May 2006.
- [UBA 2005] Versickerung und Nutzung von Regenwasser, Vorteile, Risiken, Anforderungen, Umweltbundesamt (Hrsg.), 2005
- [UmweltMagazin 2006] Desintegration mit Ozon, *UmweltMagazin*, 7/8 2006, S. 20.
- [UmweltMagazin 2008] Es fließt mehr Geld in alte Kanäle, *UmweltMagazin* Februar 2008, S. 56.
- [UN Water 2007] Coping with water scarcity: challenge of the twenty-first century, Prepared for World Water Day 2007, UN, 2007.
- [UNEP 2006] Challenges to International Waters - Regional Assessments in a Global Perspective. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya. United Nations Environment Programme (UNEP), 2006.
- [UNESCO 2006] The 2nd UN World Water Development Report: 'Water, a shared responsibility', ISBN 92-3-104006-5, UNESCO Publishing / Berghahn Books, 2005.
- [UNESCO 2003] UN/WWAP (United Nations/World Water Assessment Programme), The 1st UN World Water Development Report: Water for People, Water for Life, Paris. New York and Oxford. UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) and Berghahn Books, 2003.
- [US Department of Commerce 2003] US Department of Commerce, A survey of the use of Biotechnology in U.S: Industry, Bureau of Industry and Security, 2003.
- [Vahisalu 2008] Vahisalu T., Kollist H, Wang Y. F., Nishimura N, Chan WY, Valerio G, Lamminmäki A, Brosché M, Moldau H, Desikan R, Schroeder JI, Kangasjärvi J., SLAC1 is required for plant guard cell S-type anion channel function in stomatal signalling, *Nature*, 452, 487-491 (27 March 2008).

- [Water 2006] Overview and Comparison of Conventional Water and Nano-Based Water Treatment Technologies, Meridian Institute, 2006.
- [Wallacher 1996] Wallacher, J., Gefährdete Lebensgrundlage Wasser, Stimmen der Zeit 214 (1996), Heft 4, 219-234.
- [WCD 2000] Dams and Development, A New Framework For Decision-Making, The Report of the World Commission on Dams, Earthscan Publications Ltd, London and Sterling, VA (Hrsg.), 2000.
- [Weil 2004] Weil, K. G., Salzschnmelzen als Lösungsmittel, Chemie Ingenieur und Technik, Volume 50, Issues 4, S. 267-270, 2004.
- [Wilderer 2001] Wilderer, P.A., Paris, S., Integrierte Ver- und Entsorgungssysteme für urbane Gebiete, Abschlussbericht, Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wassergüte- und Abfallwirtschaft, 2001.
- [Wilderer 2005] Fünftes Forum Globale Fragen - *kompakt*. Stehen wir auf der Leitung? Wasserpolitik nach dem UN-Gipfel 2005, Berlin 20.10.2005. Prof. Dr. Peter Wilderer im Rahmen einer Podiumsdiskussion.
- [Winkler 2003] Winkler, U., Lemgo, Grabenlos Sanieren, Schnell und Wirtschaftlich. Wasserwirtschaft Wassertechnik (wwt), 2003.
- [Willy 2004] Willy, B., Ionic Liquids - ökologisch unbedenkliche Lösungsmittel, Universität zu Heidelberg, 2004.
- [Wired 2006] Fissure-Guided Missile in Wired, September 2006.
- [WRI 2000] World Resources Institute (WRI), World Resources 2000-2001, People and Ecosystems: The Fraying Web of Life, 2000.
- [WWF 2005] To dam or not to Dam? Five years on from the World Commission on Dams, WWF (Hrsg.), 2005.
- [WWF 2006] Rich countries, Poor Water, WWF (Hrsg.), 2006.
- [Yoon 2005] Yoon, B., Häkkinen, H., Landmann, U., Wörz, A. S., Antonierti, J., Abbet, A., Judai, K., Heiz, U., Charging Effects on Bonding and Catalyzed Oxidation of CO on Au₈ Clusters on MgO, *Science* 21, Vol. 307. No. 5708, pp. 403 - 407, January 2005.

Zukünftige Technologien Consulting

ist eine Beratungseinheit der VDI Technologiezentrum GmbH in Düsseldorf.

Zukünftige Technologien Consulting (ZTC) berät Entscheider aus

- Politik / politischer Administration / Regionen
EU - Bund - Länder - etc.
- Industrieunternehmen
Großunternehmen - KMU - junge Unternehmen - etc.
- Verbänden / Vereinen / Organisationen
Industrieverbände - Forschungseinrichtungen - etc.
- Finanzdienstleister
Banken - Venture Capital Gesellschaften - etc.
- Versicherungen
Rückversicherer - etc.

in technologischen und gesellschaftlichen Zukunftsfragen.

ZTC deckt durch ein Team verschiedenster Fachdisziplinen ein breites Themen- und Methodenspektrum ab. Systematisch und mit Unterstützung eigener Softwareinstrumente werden kundenspezifisch strategische Themen identifiziert, Ideen entwickelt sowie praxisnahe Lösungen umgesetzt.

Beispiele für Beratungsdienstleistungen sind:

- Innovations- und Technologiemonitoring
- Technologiefrüherkennung
- Newsmonitoring
- Szenarien und Prospektionen
- Studien und Innovationsanalysen
- Prozessberatungen, Prozessmoderationen
- Innovations- und Technologiemanagement
- Themengenerierung

Weitere Informationen erhalten Sie unter www.zt-consulting.de



Zukünftige Technologien Consulting
VDI Technologiezentrum GmbH
Airport City
Postfach 10 11 39
40002 Düsseldorf

Telefon: + 49 (0) 211 62 14 - 5 36
Telefax: + 49 (0) 211 62 14 - 1 39
E-Mail: zfc@vdi.de
www.zf-consulting.de