

Neue Verfahren zur Trinkwasseraufbereitung

Nouveaux procédés de traitement de l'eau potable

Tenus de satisfaire en tout temps aux prescriptions de police sanitaire, les distributeurs d'eau suisses traitent 60 % des eaux brutes selon des procédés mono-palier ou multi-paliers. Ces dernières années, l'élimination des germes et des micropolluants indésirables a fait d'énormes progrès. L'alliance des techniques de traitement traditionnelles et de la filtration membranaire remplace avantageusement les chaînes de procédés complexes.

New Procedures for the Treatment of Drinking Water

In order to constantly comply with food regulations, the public water suppliers in Switzerland treat around 60 % of the natural water used for attaining drinking water elementarily or in multi-stages. In the last few years, the respective technology has made great advances in the removal of germination and undesirable micro-pollutants. More complex procedural chains can be restored by the combination of conventional treatment technology with membrane processes.

Urs von Gunten



Um den lebensmittelrechtlichen Vorschriften jederzeit zu genügen, bereiten die öffentlichen Wasserversorgungen in der Schweiz gut 60 Prozent des für die Trinkwassergewinnung eingesetzten Rohwassers einfach oder mehrstufig auf. In den letzten Jahren hat die entsprechende Verfahrenstechnik zur Entfernung von Keimen und unerwünschten Spurenstoffen grosse Fortschritte gemacht. Durch die Kombination von konventionellen Aufbereitungstechniken mit Membranverfahren lassen sich komplexere Verfahrensketten ersetzen.

1. Einleitung

Der ökonomische Wert einer zuverlässigen Wasserversorgung misst sich unter anderem an den Kosten, welche bei einem Versagen dieses wichtigen Service public entstehen. Studien beziffern die jährlichen Folgeschäden von wasserbürtigen Krankheitsausbrüchen allein in den USA auf rund 22 Milliarden Dollar, also über 70 Dollar pro Kopf. Darunter fallen zum Beispiel Ausgaben für Medikamente, Arztbesuche und Spitalaufenthalte im Zusammenhang mit schweren Magen-Darm-Erkrankungen, aber auch Produktivitätsverluste durch Erwerbsausfall. Im Vergleich dazu beläuft sich der durchschnittliche Aufwand für die Wasseraufbereitung in der Schweiz gemäss dem SVGW auf 130 Millionen Franken oder etwa 17 Franken pro Person

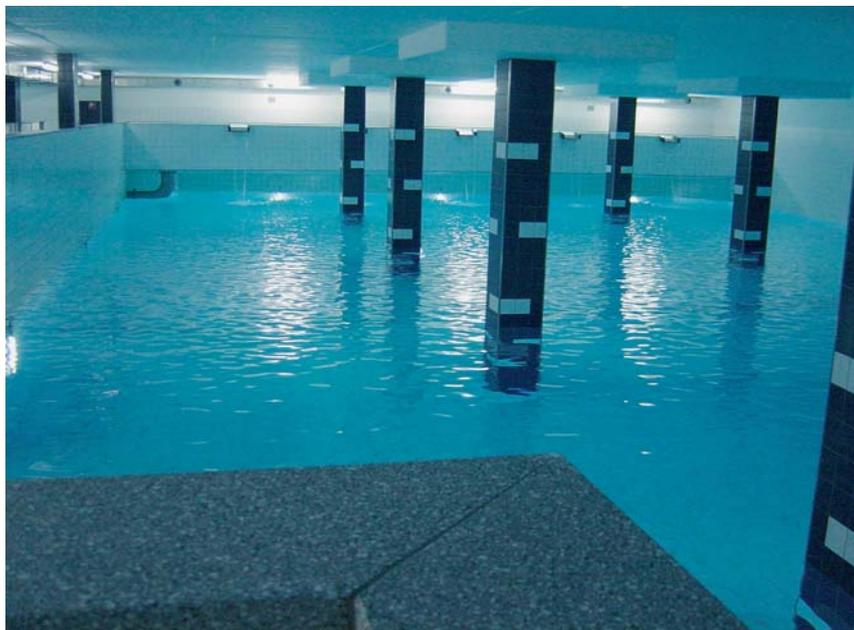


Abb. 1 Um den Vorgaben des Lebensmittelrechts jederzeit zu genügen, werden in der Schweiz gut 60 Prozent des Trinkwassers aufbereitet. (Quelle: WWA Bern)

und Jahr. Der *vorsorgliche Schutz* der menschlichen Gesundheit – durch die Entfernung von Fremdstoffen aus dem Rohwasser und seine Entkeimung – macht somit nur einen Bruchteil der bei ungenügender Hygiene anfallenden Folgekosten aus (Abb. 1).

2. Sicherung der Wasserqualität

Aufgrund der Lebensmittelverordnung sind hierzulande alle Wasserversorgungen verpflichtet, gemäss dem HACCP¹-Konzept die *kritischen Bereiche* zu bestimmen, welche sich bei der Bereitstellung ihres Trinkwassers aus Sicht der Gesundheit ergeben. Gestützt auf diese Gefährdungsanalyse müssen sie *geeignete Massnahmen* zur Reduktion allfälliger Risiken treffen. Als mögliche Schwachpunkte kommen etwa die Güte des Rohwassers, die Zuverlässigkeit der Aufbereitung oder die Trinkwasserqualität im Verteilnetz

in Frage. Dabei bilden vertiefte Kenntnisse über die Wasserressourcen vor Ort für jede Versorgung eine Grundvoraussetzung, um die notwendigen Prozesse optimal der lokalen Situation und den natürlichen Schwankungen anpassen zu können.

Grössere Wasserwerke verfügen im Allgemeinen bereits heute über sehr gut ausgebaute *Qualitätssicherungssysteme*, welche Gefährdungen der Konsumenten durch Mikroorganismen oder chemische Verunreinigungen nahezu ausschliessen. Dazu gehört auch eine kontinuierliche Überwachung, die es erlaubt, Belastungen des Wassers mit Schadstoffen frühzeitig zu erkennen. Zu diesem Zweck setzt etwa die Wasserversorgung Zürich Organismen ein, die in ihrem Verhalten sensibel auf Umweltveränderungen reagieren. Die Trinkwasserqualität wird mit Hilfe von *Daphnien* überwacht (Abb. 2). Ist das Wasser mit Schadstoffen belastet, verändern sich die Bewegungsmuster dieser Wasserflöhe. Eine Software erkennt dies und löst je nach

Stärke der Abweichung einen Alarm aus. Generell ist das Monitoring mit dem so genannten Daphnientoximeter empfindlicher und die Reaktion schneller als beim Strömungsfischtest mit Forellen.

2.1 Zwingende Seewasseraufbereitung

Wo die Qualität des Rohwassers den Anforderungen der Lebensmittelgesetzgebung für Trinkwasser nicht genügt, muss aufbereitet werden. Dies gilt zwingend für alle 30 Seewasserwerke in der Schweiz, welche in der Regel über mehrstufige Verfahren zur Entkeimung und Reinigung verfügen.

Während im Fall des Grundwassers die natürlichen belebten Bodenschichten die versickernden Niederschläge filtern, hat das gefasste Seewasser von Natur aus keinen derart effizienten Reinigungsprozess durchlaufen. Bereits die Betreiber der ersten Seewasserwerke im Inland, die gegen Ende des 19. Jahrhunderts in den Städten Zürich und St. Gallen ans Netz gingen, kopierten deshalb das *Prinzip der Natur* und bauten Filter, in denen das Rohwasser eine Schicht aus *Sand* passiert. Diese älteste Aufbereitungsmethode entfernt vor allem Partikel, reduziert den assimilierbaren organischen Kohlenstoff und eliminiert teilweise auch Mikroorganismen. Sie bietet aber keinen vollumfänglichen Schutz vor Krankheitserregern im Rohwasser. Der Unterhalt der einfach aufgebauten Anlagen ist unkompliziert, doch erfordert das Verfahren einen relativ grossen Flächenbedarf (Abb. 3).

In der Zwischenzeit sind die *hygienischen Anforderungen* deutlich gestiegen, so dass Seewasserwerke heute zumeist mehrere Aufbereitungsverfahren wie *Ozonung*, *Sandfiltration* und *Aktivkohlefiltration* kombinieren. Zum Teil wird durch Zugabe von *Natronlauge* noch der Säuregrad des Wassers gesenkt, damit es im Verteilnetz nicht zu Korrosionsschäden kommt.



Abb. 2 Weil Daphnien sensibel auf Veränderungen der Wasserqualität reagieren, setzt man diese Wasserflöhe zur Überwachung des Trinkwassers ein. (Quelle: Christian Rellstab, Zürich)

¹ HACCP = Hazard Analysis Critical Control Point



Abb. 3 Sandfilter – wie hier im Seewasserwerk Neuenburg – sind eine der ältesten Aufbereitungsmethoden. (Quelle: BAFU)

Je nach Werk durchläuft das auf diese Weise gereinigte Wasser vor der Einspeisung ins Reservoir noch einen *Langsandsandfilter*. Um eine erneute Verkeimung im Leitungsnetz zu verhindern, werden dem Trinkwasser aus Sicherheitsgründen manchmal noch geringe Mengen an *Chlor* oder *Chlordioxid* beigemischt.

In neueren oder modernisierten Anlagen bereitet man das Seewasser teilweise auch unter Einbezug von *Membranfilteranlagen* auf. Dabei wird das Rohwasser durch ein Membran mit sehr feinen Poren in der Grössenordnung von 0,01 Mikrometer hindurchgepresst, wobei allfällige partikuläre Verschmutzungen in den Membranen hängen bleiben. Dieses Verfahren benötigt viel weniger Platz als die klassische Seewasseraufbereitung mit den grossen Sandfilterbecken.

2.2 Entkeimung des Grundwassers

Im Gegensatz zum Seewasser, das in der Schweiz knapp einen Fünftel der gesamten Trinkwasserproduktion ausmacht, können die Versorgungen fast die Hälfte des Grundwassers *ohne Behandlung* direkt als Trinkwasser nutzen. Für drei Viertel des behandelten Grundwassers genügt eine *einfache Aufbereitung*, und der Rest durchläuft zwei oder mehr Reinigungsverfahren. Dies hängt damit zusammen, dass vor allem bei verschmutzungsanfälligen Fassungen im *Karstgebiet* eine einmalige Desinfektion oft nicht ausreicht, um sämtliche gesundheitsgefährdenden Mikroorganismen erfolgreich abzutöten. So sind etwa Viren gegenüber einer *UV-Bestrahlung* resistenter als die Fäkalbakterien *E. coli*, während die Oozysten des Parasiten *Cryptosporidium parvum* relativ unempfindlich auf die sonst ziemlich effiziente Chlorung des Trinkwassers reagieren.

Deshalb ist es wichtig, die Wahl der Aufbereitungstechnologien sowie die Dosierung gut auf das jeweilige Rohwasser abzustimmen. So muss zum Beispiel bei der Desinfektion mit Chlor auch darauf geachtet werden, dass eine Überdosierung zur Bildung von *unerwünschten Nebenprodukten* wie etwa chlorierten Kohlenwasserstoffen – zum Beispiel in Form von Trihalogenmethanen wie Chloroform – führen kann, wenn der DOC (gelöster organischer Kohlenstoff)-Gehalt des Rohwassers erhöht ist. Beim Einsatz von zu viel Chlordioxid entstehen zwar keine Trihalogenmethane, aber Chlorit und Chlorat.

Da die gebräuchlichen Desinfektionsmittel hierzulande nur in geringen Konzentrationen zur Anwendung gelangen, stellen diese Nebenprodukte der Wasseraufbereitung jedoch kein wesentliches Problem dar. Dies gilt auch für die potenziell krebserregende Substanz *Bromat*, welche sich bei einer zu starken Ozonung im Trinkwasser bilden kann. Der entsprechende Toleranzwert von zehn Mikrogramm pro Liter ($\mu\text{g}/\ell$) wird normalerweise problemlos eingehalten, wie eine Untersuchung von etwa 80 Ozonanlagen in der Schweiz gezeigt hat (Abb. 4).

2.3 Trinkwasseranalytik

Neue Methoden der Trinkwasseranalytik erlauben es heute, *mikro-*



Abb. 4 Die Begasung des Wassers mit Ozon inaktiviert Krankheitserreger wie Bakterien und Viren. (Quelle: Wasserversorgung Zürich)

bielle Belastungen viel genauer und schneller zu erfassen als mit der herkömmlichen Kultivierung auf Nährmedien. Ein Beispiel dafür ist das bisher in der Medizin verwendete Messverfahren der *Durchflusszytometrie*. Es liefert mit der *Gesamtzellzahl* eine neue Grösse zur Bestimmung der hygienischen Trinkwasserqualität. In Kombination mit Färbungen und der Messung des Stoffwechselprodukts ATP (Adenosintriphosphat) sind auch Aussagen über die Vitalität der Mikroorganismen möglich. Dank den *molekularen Methoden* können gewisse Gruppen von Organismen oder sogar Arten direkt nachgewiesen werden. Weil davon auszugehen ist, dass weiterhin neue Krankheitserreger auftreten, sind diese modernen Analytikverfahren besonders wichtig, da sie eine wesentlich bessere Datenerfassung ermöglichen. Durch eine Analyse ihres genetischen Materials lassen sich inzwischen auch Viren mit molekularen Methoden quantifizieren. Damit tragen die neuen Messverfahren auch dazu bei, dass Fachleute die mikrobiellen Prozesse während der Aufbereitung und Verteilung des Trinkwassers besser verstehen.

Zusätzliche Informationen zur Optimierung der Aufbereitungsprozesse sowie der Wasserqualität im Verteilnetz liefern neue – gesetzlich noch nicht vorgeschriebene – Trinkwasserparameter wie etwa der *assimilierbare organische Kohlenstoff* (AOC). Es handelt sich dabei um denjenigen Anteil des natürlichen organischen Materials, der von Mikroorganismen direkt aufgenommen wird. Der AOC-Gehalt ist also ein Beurteilungskriterium für die biologische Stabilität des Wassers. Bei sehr geringen AOC-Konzentrationen können keine Krankheitserreger mehr wachsen, was die Zugabe eines Netzschutzes überflüssig macht. Dank rascher Bestimmung dieses

Parameters mittels Durchflusszytometer eignet sich die Messmethode neuerdings zur Überwachung von Aufbereitungsanlagen. Bei einem entsprechenden Projekt der Eawag in Zusammenarbeit mit der Wasserversorgung Zürich hat sie sich denn auch bereits in der Praxis bewährt (Abb. 5).

Chemische Spurenstoffe

Die raschen Fortschritte im Bereich der Messtechnik haben ebenfalls zur Folge, dass im Wasser immer mehr Spuren verschiedenster chemischer Substanzen gefunden werden. So erlaubt etwa die Kombination der Flüssigchromatographie mit der Massenspektrometrie auch den Nachweis von *polaren Mikroverunreinigungen* in geringsten Konzentrationen von einigen Milliardstel Gramm pro Liter Wasser. Die Einschätzung des Gesundheitsrisikos durch diese chemischen Stoffe und ihre Abbauprodukte bereitet insofern Probleme, als deren toxikologisch relevante Dosen vielfach nicht bekannt sind. Zudem weiss man noch wenig darüber, wie sich Mischungen solcher

Substanzen auf den Menschen auswirken (Abb. 6).

2.4 Grundwasserschutz

Gemessen an der Gesamtmenge des von öffentlichen Versorgungen gewonnenen Trinkwassers werden in der Schweiz gegenwärtig etwa 33 Prozent des Rohwassers einfach und 29 Prozent mehrstufig aufbereitet. Damit müssen die Wasserwerke gut 600 Millionen Kubikmeter behandeln, während knapp 400 Millionen Kubikmeter ohne Aufbereitung auskommen. Der SVGW beziffert die jährlichen Gesamtkosten der Trinkwasseraufbereitung aus Seewasser auf rund 130 Millionen Franken, was pro behandelten Kubikmeter durchschnittlich rund 20 Rappen entspricht. Somit ersparen die hierzulande getroffenen Massnahmen zum Schutz des Grundwassers den Wasserwerken mittlere Behandlungskosten von mindestens 80 Millionen Franken pro Jahr. Die effektiven *Einsparungen* sind aber vermutlich deutlich höher, da vor allem kleine Versorgungen keine Aufbereitung besitzen. Zudem handelt es sich bei



Abb. 6 Der Boden ist zwar ein effizienter Filter, wie dieser Vergleich von verschmutztem Strassenabwasser mit dem Sickerwasser am gleichen Ort in 0,5 und 1 Meter Tiefe zeigt. Trotzdem werden nicht alle Schadstoffe zurückgehalten. (Quelle: GSA Bern)



Abb. 7 Im Gebiet Lange Erlen nutzen die Industriellen Werke Basel den mikrobiologisch aktiven Waldboden als natürlichen Filter zur Reinigung von Rheinwasser. (Quelle: IWB)

vielen der bestehenden Reinigungsverfahren um relativ einfache Anlagen, die im Fall einer Verschlechterung der Rohwasserqualität ersetzt oder zumindest erweitert werden müssten (Abb. 7).

3. Weiterentwicklung der Aufbereitung

3.1 Membranverfahren

Die Entwicklung der Technologien zur Wasseraufbereitung hat besonders im letzten Jahrzehnt grosse Fortschritte gemacht. Dies gilt vorab für verschiedene Membranverfahren, die heute bei Ausbau- oder Neubauprojekten von Wasserwerken häufig zur Anwendung kommen. Sie bewähren sich, wenn eine hygienische Gefährdung des Trinkwassers durch das Rohwasser besteht. Membranverfahren benötigen zudem weniger Platz als die klassischen Sandfilteranlagen, was sich – bedingt durch den starken Nutzungsdruck und die dementsprechend hohen Landpreise in der Schweiz – kostenmindernd auswirkt (Abb. 8).

Je nach Typ der Membranfiltration können die Wasserversorgungen sowohl Partikel als auch



Abb. 5 Neue Methoden der Wasseranalytik ermöglichen es, allfällige Belastungen genauer und rascher zu erfassen als früher. (Quelle: Wasserversorgung Zürich)

gelöste Stoffe aus dem Rohwasser entfernen. Anhand der *Porengrösse* und der dadurch abtrennbaren Molekularmassen wird zwischen Mikrofiltration, Ultrafiltration, Nanofiltration und Umkehrosiose unterschieden (Tab. 1).

Mikrofiltration

Die Mikrofiltration dient der Entfernung von Bakterien, Algen und Kolloiden aus dem Rohwasser. Bei Pilotversuchen der Eawag zur Aufbereitung von Karstwasser zeigten sich jedoch einige Nachteile. So wurde der Durchfluss durch die Membran schon bei relativ geringer Trübung stark reduziert. Zudem nahm die Durchlässigkeit trotz einer chemischen Reinigung und häufigen Rückspülungen irreversibel ab.

Ultrafiltration

Unter allen Membranverfahren gilt die Ultrafiltration derzeit als die am *besten geeignete Methode* zur Aufbereitung des Trinkwassers in der Schweiz. Anwendung findet sie zum Beispiel bei Karstquellen mit ihrer oft stark schwankenden Rohwasserqualität. Die gängige Behandlung mit mehreren Aufbereitungsstufen – wie zum Beispiel Flockung, Sandfiltration, Ozonzugabe, Aktivkohlefiltration und Netzschutz – stellt hohe fachliche Anforderungen an den Betreiber. In solchen Fällen kann die Ultrafiltration von Karstwasser diese komplexen Verfahrensketten ersetzen und gleichzeitig die hygienische Gefährdung reduzieren. Die Methode gewährleistet eine *einwandfreie Entkeimung* bis hin zu Viren. Treten auch Probleme mit Spurenstoffen auf, muss sie allerdings mit an-



Abb. 8 Trinkwasseraufbereitung durch Ultrafiltration in Frutigen BE. (Quelle: WWA Bern)

| Verfahren | Porengrösse [μm] | Abtrennbare Molekularmasse [Dalton] |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Mikrofiltration | > 0,05 | > 500 000 |
| Ultrafiltration | 0,002 – 0,05 | 1000 – 500 000 |
| Nanofiltration | 0,001 – 0,002 | 100 – 1000 |
| Umkehrosiose | < 0,001 | < 100 |

Tab. 1 Die vier Membranverfahren im Vergleich.

deren Aufbereitungstechnologien kombiniert werden (*s. unten*). Als einfaches, kompaktes Verfahren, das wenig Wartung bedingt, empfiehlt es sich auch für kleine Wasserversorgungen. In Bergregionen besteht zudem die Möglichkeit, das Gefälle zur Druckerzeugung für die Filtration auszunutzen und so den Energieverbrauch stark zu verringern (Abb. 9). Ein weiterer Anwendungsbereich der Ultrafiltration sind Seewasserwerke, die saniert oder neu erstellt werden müssen. Damit sie auch nach Ersatz der Sandfiltration über ein *Multibarrierensystem* zur Abtrennung von Mikroorganismen und Spurenstoffen verfügen, ist eine Kombination mit Ozon oder Aktivkohle angezeigt, wobei auch beide Aufbereitungsmethoden zusammen eingesetzt werden können. Diese Kombinationsverfahren hat die Eawag im Rahmen des Projekts *Wave21* in Zusammenarbeit mit der Wasserversorgung Zürich und einem führenden Unternehmen auf dem Gebiet der Wasserreinigung untersucht.

Nanofiltration

Die Nanofiltration eignet sich vor allem für die Entfernung von natürlichem organischem Material, Spurenstoffen und Mikroorganismen und führt gleichzeitig zu einer Teilenthärtung des Rohwassers. Der Betrieb einer entsprechenden Pilotanlage in der Schweiz zeigte aber, dass dieses Verfahren *sehr anfällig* auf geringste partikuläre Verunrei-



Abb. 9 Innenleben eines Membranfilters. Im Bereich der Ultrafiltration beträgt die Porengrösse nur gerade 2 bis 50 Milliardstel Meter. (Quelle: WWA Bern)

nigungen reagiert, so dass man es nur für die Aufbereitung von vorbehandeltem oder lediglich schwach belastetem Wasser einsetzen kann. Zudem können sich bei der Entsorgung der Rückstände aus der Nanofiltration Probleme ergeben, da hier die Spurenstoffe stark aufkonzentriert sind. Auch ist der *Energieverbrauch* im Vergleich zur Ultrafiltration wesentlich höher. Im Bereich der Trinkwasseraufbereitung wird sich die Nanofiltration im Inland deshalb kaum etablieren.

Umkehrosiose

Die Umkehrosiose ist ein physikalisches Verfahren, um in Flüssigkeiten gelöste Stoffe aufzukonzentrieren. Dabei wird das Wasser von beinahe allen übrigen Stoffen abgetrennt. Nur bei unpolaren Verbindungen unter 1000 Dalton Molekulargewicht ist die Filterleistung weniger gut. Dieses Verfahren wird vor allem für

die Trinkwassergewinnung aus *Meerwasser* oder Brackwasser sowie für das Recycling von *Abwasser* eingesetzt. In der Schweiz nutzt man die Umkehrosmose zur Aufbereitung eines stark sulfathaltigen Quellwassers in Zermatt. Da der Energiebedarf generell sehr hoch ist und der Rückstand entsorgt werden muss, dürfte dieses Verfahren in inländischen Wasserwerken kaum breite Anwendung finden.

3.2 Adsorption mit Aktivkohle

Neben diesen Neuentwicklungen gibt es eine Reihe von Behandlungsmethoden zur Reinigung des Trinkwassers, die bereits seit geraumer Zeit praxiserprobt sind. Dazu gehört auch die Adsorption mit Aktivkohle. Letztere kann *gelöste organische Spurenstoffe* wie etwa Pestizide, chlorierte Kohlenwasserstoffe, Arzneimittel oder Geschmacks- und Geruchsstoffe aus dem Rohwasser eliminieren. Es lassen sich auch Restmengen von Oxidations- und Desinfektionsmitteln entfernen. Zudem eignet sich das Adsorptionsmittel – etwa in Form von Pulveraktivkohle – zur Behandlung von kurzfristig auftretenden Verschmutzungen des Rohwassers. Schliesslich kann die Aktivkohle auch als Trägermaterial für Mikroorganismen dienen, die den *assimilierbaren organischen Kohlenstoff* (AOC) abbauen.

3.3 Desinfektion und Oxidation

Chlor und Chlordioxid

Die Behandlung des Trinkwassers mit Chlor oder Chlordioxid dient der Desinfektion und Oxidation von gelösten Stoffen und eignet sich unter anderem für den *Netzschutz*. Sie kann Viren und vegetative Bakterien unschädlich machen, hat aber nur eine beschränkte Wirkung auf Einzeller und Bakteriensporen. Chlor ist auch in der Lage, Bromid und

Iodid zu oxidieren, wobei jedoch chlor-, brom- oder iodhaltige Stoffe entstehen können, die zum Teil aus gesundheitlicher Sicht bedenklich sind. Beim Einsatz von Chlordioxid bilden sich zudem die Desinfektionsnebenprodukte Chlorit und Chlorat (*Abb. 10*).

Ozonung

Aufgrund der relativ schwierigen Handhabung von Ozon eignet sich dieses Verfahren vor allem für *grössere Wasserversorgungen*. Als Desinfektionsmittel wird Ozon zur Inaktivierung von Bakterien, Viren und gewissen Einzellern eingesetzt. Bedingt durch seine relativ kurze Lebensdauer im Wasser kommt es als Netzschutz aber nicht in Frage. Beim Zerfall von Ozon bilden sich OH-Radikale, die als sehr starke Oxidantien wirken und auch ozonresistente Spurenstoffe oxidieren können. Durch die chemische Reaktion mit natürlichem organischem Material entstehen gut abbaubare niedermolekulare Stoffe wie etwa organische Säuren oder Aldehyde. Diese unter der Sammelbezeichnung AOC zusammengefassten Substanzen müssen in einer nachfolgenden biologischen Aufbereitungsstufe abgebaut werden, um ein biologisch stabiles Trinkwasser zu garantieren.

UV-Anlagen

Für die Trinkwasseraufbereitung gibt es zwei Arten von Ultraviolett-Verfahren:

- *UVC-Anlagen* basieren auf *Niederdruck* und emittieren im Wellenlängenbereich von 254 nm. Bei diesen Anlagen wirkt das UV-Licht durch die Beschädigung der DNA desinfizierend.
- UV-Anlagen, welche bei *Mitteldruck* arbeiten, emittieren zusätzlich zum Wellenlängenbereich von 254 nm auch im UVB/A-Bereich



Abb. 10 Das im Javelwasser enthaltene Chlor ist ein wirksames Desinfektionsmittel und wird hier automatisch zudosiert. (Quelle: WWA Bern)

reich und im Bereich des sichtbaren Lichts. So können auch Proteine geschädigt werden. Mit UV-Anlagen, die praktisch keine Desinfektionsnebenprodukte bilden, lassen sich auch parasitäre Erreger abtöten. Die desinfizierende Wirkung der UV-Strahlung ist aber nur bei einer geringen Trübung des zu behandelnden Wassers von höchstens 1 NTU (Nephelometrischer Trübungsgrad) gewährleistet. Um das Risiko einer Wiederverkeimung im Verteilnetz zu minimieren, muss der Aufbereitung des Trinkwassers mit UV-Anlagen bei Bedarf noch ein Netzschutz folgen (*Abb. 11*).

Weitergehende Oxidationsverfahren (AOP)

Sollen auch organische Stoffe abgebaut werden, so kann eine Wasserversorgung die konventionelle Behandlung ihres Rohwassers mit anderen Verfahren kombinieren. Dabei kommen weitergehende Oxidationsverfahren (AOP) zum Einsatz, die hoch reaktive OH-Radikale erzeugen. Diese reagieren unspezifisch und rasch mit organischen Stoffen, was zugleich auch ihr grösster Nachteil ist. Durch die Reaktion der OH-Radikale mit Bicarbonat und natürlichem organischem Material kann viel Oxidationskraft verloren gehen. Bei der Trinkwasserbehandlung dienen AOP zum Abbau von Stoffen, die zum Beispiel gegenüber Ozon resistent sind oder in der Aufbereitung sonst nicht zurückgehalten werden. Im Vergleich mit der konventionellen Ozonierung haben ozonbasierte AOP den Vorteil einer kürzeren Reaktionszeit, so dass die Wasserversorgung Ozon höher dosieren kann, ohne dass am Ende des Prozesses die Ozonkonzentration im Trinkwasser zu hoch ist. Je nach Qualität des Rohwassers stehen die folgenden *vier AOP-Verfahren* zur Verfügung:



Abb. 11 Eine UV-Behandlung zur Desinfektion empfiehlt sich nur bei einer geringen Trübung des zu behandelnden Wassers. (Quelle: WWA Bern)

- *Ozon/H₂O₂*: Diese Aufbereitungsmethode ist als Ergänzung zur konventionellen Ozonung entwickelt worden, um persistente Spurenstoffe aus dem Trinkwasser zu entfernen. Die Bildung der erforderlichen OH-Radikale erfolgt in einer Kettenreaktion, die durch die Reaktion von Ozon mit dem Wasserstoffperoxid gestartet wird. Der Prozess lässt sich auch zweistufig betreiben, wobei im ersten Schritt nur Ozon zudosiert wird, das desinfiziert und spezifisch mit organischen Stoffen reagiert. Erst danach folgt die Zugabe von Wasserstoffperoxid, das die Zersetzung von Ozon in OH-Radikale beschleunigt.
- *H₂O₂/UV*: UV-Anlagen in Kombination mit der Zugabe von Wasserstoffperoxid sind das gebräuchlichste Verfahren zur weitergehenden Oxidation mittels UV-Strahlung. Vorteil dieser Methode ist, dass kein Bromat entsteht. Der Prozess basiert auf der direkten chemischen Zersetzung des Wasserstoffperoxids durch das UV-Licht, wobei die reaktiven OH-Radikale entstehen. Der Energiebedarf für dieses Verfahren ist wesentlich höher als für die UV-Desinfektion und das Verfahren Ozon/H₂O₂.
- *Ozon/UV*: Bei diesem Verfahren wird Ozon durch die UV-Aktivierung gespalten und reagiert mit Wasser zu Wasserstoffperoxid. Der Mechanismus ist gleich wie bei der Kombination Ozon/H₂O₂, doch muss das Wasserstoffperoxid hier zuerst durch die Aktivierung mit UV gebildet werden.
- *Wasserphotolyse (Vakuum-UV)*: Vakuum-UV-Anlagen arbeiten mit hochenergetischen elektromagnetischen Strahlen im Wellenlängenbereich von 120 bis 200 nm. Dabei wird Wasser aufgespalten, und es bilden sich so

direkt OH-Radikale, jedoch nur in einer sehr dünnen Schicht über der Lampe. Deshalb ist die Methode sehr energieintensiv und wird deshalb nur als Nischentechnologie eingesetzt.

3.4 Flockung, Fällung, Sedimentation

Flockung und Fällung

Die Flockung eignet sich zur Entfernung *kolloidaler Partikel*. Mittels Zugabe von Aluminium- oder Eisensalzen werden diese Partikel durch die Überwindung der Abstossungskräfte an ihrer Oberfläche zu Agglomeraten zusammengeführt. Diese lassen sich in einem nachfolgenden Verfahren wie der Filtration oder Sedimentation effizient entfernen. Das Verfahren eignet sich jedoch nicht zur Abtrennung von Spurenstoffen.

Sedimentation

Als sehr *einfaches* und *billiges Verfahren* kommt die Sedimentation zur Entfernung partikulärer Stoffe im Rohwasser fast ohne Energieaufwand aus, da die Bodensatzbildung auf der Schwerkraft basiert. Die Methode eignet sich für Rohwässer mit hohen Feststoffgehalten und Partikelgrößen von mehr als einem Millimeter. Sind kleinere Partikel zu entfernen, so kann die Sedimentation in Kombination mit einer Flockung und Fällung zum Einsatz kommen.

3.5 Aufbereitungen für Haushalte

Im internationalen Vergleich sind die Qualitätsstandards für Trinkwasser in der Schweiz sehr hoch. Zudem verfügen die meisten Siedlungen über einen Anschluss an eine zentrale Wasserversorgung. So gesehen erstaunt es, dass im Internet eine Vielzahl von *Kleinstanlagen* für die Trinkwasseraufbereitung angeboten werden. Die Palette umfasst

Geräte zur Enthärtung, Ultrafiltration, Destillation, Entsäuerung und UV-Bestrahlung. Im Verkauf sind auch kombinierte Anlagen von Aktivkohle und Mikrofiltration, Verfahren nach dem Prinzip der Umkehrosiose sowie verschiedenste alternative Aufbereitungseinheiten. Diese werden entweder direkt an einen Wasserhahn angeschlossen oder vor einen Wassertank geschaltet, aus dem dann ein Haushalt oder mehrere ihr Trinkwasser beziehen. Die Bereitstellung von qualitativ hochwertigem Trinkwasser liegt grundsätzlich in der Verantwortung der öffentlichen Wasserversorgungen und lässt sich nicht an private Betreiber von Kleinanlagen delegieren. Bereits heute sind in der Schweiz viele kleinere Gemeinden mit den technischen Anforderungen einer gut funktionierenden Wasseraufbereitung stark gefordert, so dass eine weitergehende Dezentralisierung auf der Stufe von Kleinsiedlungen oder gar von Haushalten wenig sinnvoll erscheint und diese Problematik eher noch verschärfen würde.

Keywords

Trinkwasseraufbereitung – Analytik – neue Verfahren

Adresse des Autors

Urs von Gunten
Abteilung Wasserressourcen und
Trinkwasser
Eawag
Überlandstrasse 133
Postfach 611
CH-8600 Dübendorf
Tel. +41 (0)44 823 52 70
vongunten@eawag.ch