9 Wasseraufbereitung

Genügt die Qualität des Rohwassers den Anforderungen an ein einwandfreies Trinkwasser nicht, so muss es aufbereitet werden. Die Aufbereitung kann je nach Situation die chemischen, physikalischen oder hygienischen Eigenschaften des Wassers betreffen. Aufbereitungen ohne Desinfektion (Hygiene) sind nicht sinnvoll.

In Abb. 9.1 ist die Aufgabe der Trinkwasseraufbereitung charakterisiert. Ein Rohwasser, dessen Qualität sehr variabel sein kann, muss soweit aufbereitet werden, dass es beim Verbraucher noch Trinkwasserqualität hat. Es soll zudem in den Verteilleitungen nicht korrosiv sein und keine organischen Nährstoffe enthalten, die Mikroorganismen ein Wachstum (Vermehrung) erlauben und so im Netz zu einer Wiederverkeimung führen.

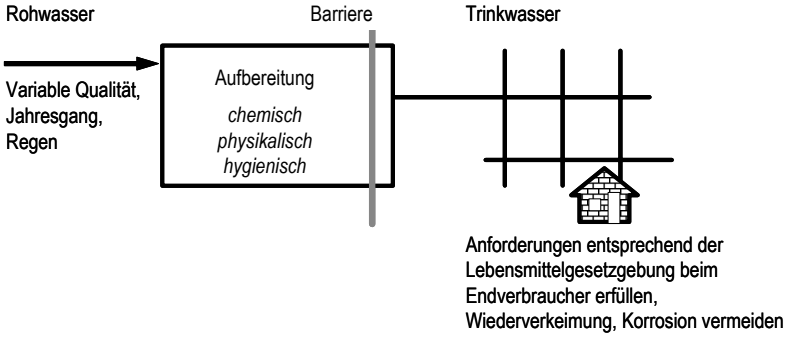

Abb. 9.1. Die Aufgabe der Trinkwasseraufbereitung ist, ein Rohwasser mit variabler Qualität chemisch, physikalisch und hygienisch soweit aufzubereiten, dass es beim Verbraucher Trinkwasserqualität hat

Bei der Gewinnung von Wasser für zentrale Wasserversorgungsanlagen ist anzustreben, dass das Wasser von Natur aus den Anforderungen an Trinkwasser genügt. Bei grosser Besiedelungsdichte muss auch Wasser genutzt werden, das ohne Aufbereitung nicht als Trinkwasser dienen kann. Die erforderliche Aufbereitung des Wassers muss auf die Rohwasserqualität ausgerichtet sein und kann nicht generell festgelegt werden. Häufig wird es erforderlich sein, im Rahmen von Pilotversuchen eine geeignete Kombination von Verfahren und deren Auslegung zu erarbeiten – eine Aufgabe die Spezialisten (Limnologen, Hydrogeologen, Hygieniker, Chemiker, Verfahrensingenieure, Bauingenieure) in Zusammenarbeit lösen.

Tabelle 9.1 ist eine Zusammenstellung der angewendeten Aufbereitung des Trinkwassers in Abhängigkeit der Herkunft des Wassers. Quell- und Grundwasser wird in kleinen Wasserversorgungen (75% der Anlagen) meist direkt ins Netz eingespiesen, während wenige grosse Wasserwerke (5% der Anlagen) ihr Trinkwasser durch aufwändige Aufbereitungsverfahren herstellen.

Tabelle 9.1. Trinkwasseraufbereitung nach Art der Wasserherkunft. Situation in der Schweiz 1995, totale Produktion von Trinkwasser 1067.5 Mio. m^3 (BUWAL 1998)

Aufbereitung	Anlagen	Wassermenge in % der totalen Produktion			
		Quellwasser	Grundwasser	Seewasser	Total
mehrstufig[a)]	5 %	4 %	9 %	16 %	29 %
einstufig[b)]	20 %	17 %	16 %	0 %	33 %
keine	75 %	21 %	17 %	0 %	38 %
Total	100 %	42 %	42 %	16 %	100 %

a) Mehrstufige Aufbereitung umfasst Prozesse wie Chlorierung, Ozonierung, Versickerung, Filtration, Adsorption, Desinfektion, Neutralisation

b) Einstufige Aufbereitung heisst Desinfektion und kann gelegentlich eine Entsäuerung oder Belüftung miteinschliessen.

9.1 Desinfektion

Die Desinfektion ist das häufigste Aufbereitungsverfahren in der Wasserversorgung. Sie gewährleistet die Hygiene des Trinkwassers.

Ziel der Desinfektion in der Trinkwasseraufbereitung ist die Vermeidung von Krankheiten, die über das Trinkwasser übertragen werden. Dazu müssen Krankheitserreger (Mikroorganismen: Protozooen, Bakterien, Viren) abgetötet werden. Das ist möglich durch Hitzeeinwirkung (Abkochen), ultraviolette (UV) oder γ-Strahlung, bakterizide Metalle (Silber, Kupfer), starke Säuren und Basen, oberflächenaktive Stoffe und chemische Oxidationsmittel sowie Sterilfiltration. In der Wasserwerkspraxis ist der Einsatz von chemischen Oxidationsmitteln wie Cl_2 (Chlor), O_3 (Ozon), ClO_2 (Chlordioxid) weit verbreitet. In kleinen Werken wird UV eingesetzt. Silber wird gelegentlich zur Konservierung von Wasser genutzt. Abkochen wird in Notfällen empfohlen.

UV-Strahlung eignet sich für die Anwendung in kleinen Anlagen. Eine dünne Wasserschicht (1cm) wird während wenigen Sekunden mit UV-Strahlung von 265 nm Wellenlänge und hoher Intensität bestrahlt (Abb. 9.2). Ein Vorteil ist, dass sich keine Nebenprodukte bilden. Nachteilig ist, dass sich keine nachhaltige Wirkung ergibt (Netzschutz).

Ozon ist ein giftiges und instabiles Gas. Es wird am Ort des Einsatzes mit grossem Energieaufwand erzeugt (Abb. 9.3). Ozon hat den Vorteil, dass sich nur geringe Mengen von unerwünschten Nebenprodukten bilden. Es hat den Nachteil, dass es schnell zerfällt und daher keinen Schutz des Verteilnetzes ergibt. Ozonisierungsanlagen sind aufwändig, entsprechend wird Ozon v.a. in grösseren Aufbereitungsanlagen eingesetzt (Abb. 9.4).

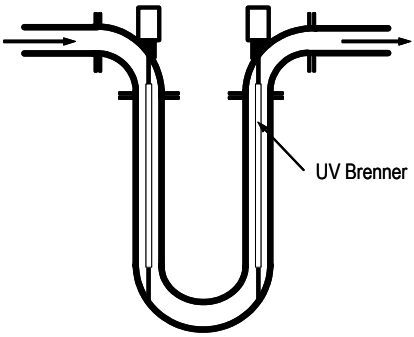

Abb. 9.2. Beispiel einer Desinfektionsanlage mit UV Strahlung

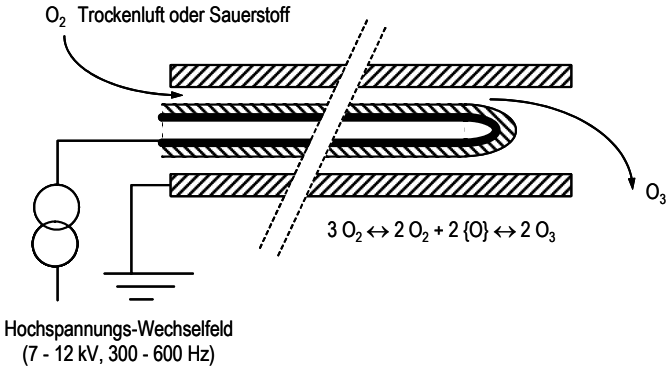

Abb. 9.3. Schematische Darstellung einer Ozonerzeuger-Anlage: Mehrere solche Rohre werden parallel betrieben

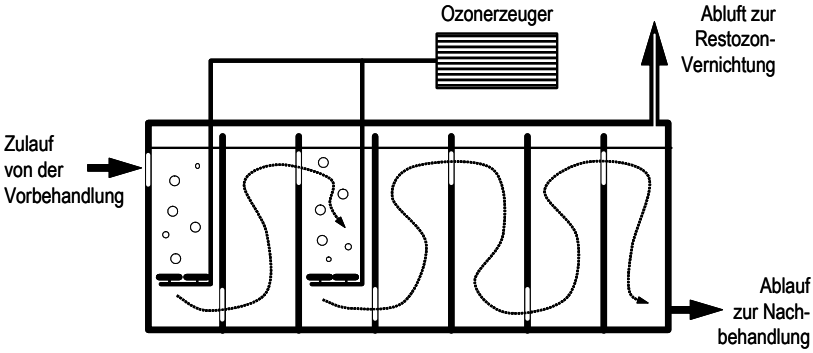

Abb. 9.4. Darstellung eines Ozonierungsreaktors: Eine längsdurchströmte Kaskade, Ozoneintrag am Anfang, zusätzliche Reaktionszeit gegen Ende des Reaktors, zuverlässige Restozonvernichtung

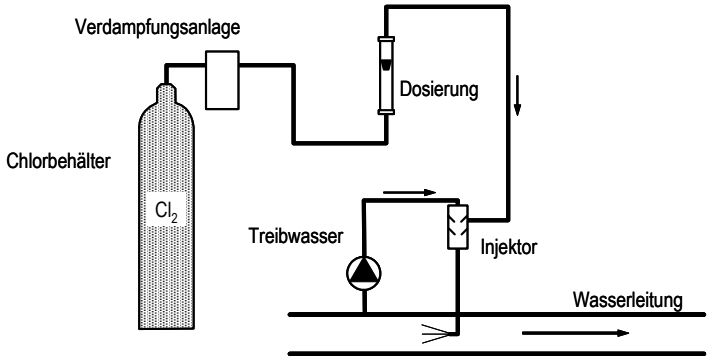

Abb. 9.5. Darstellung einer einfachen Dosierung von Chlorgas direkt in die Transportleitung einer Wasserversorgung

Chlor ist das Desinfektionsmittel, das weltweit am häufigsten eingesetzt wird. Es hat den Nachteil, dass es mit organischen Stoffen im Wasser reagiert und dabei möglicherweise krebserzeugende Substanzen bildet. Chlorgas kann gelagert werden, sein Einsatz ist einfach und billig und hat den Vorteil, dass Chlor über längere Zeit im Wasser wirksam bleibt und dadurch auch das Verteilnetz schützt (Abb. 9.5). Dem Einsatz von Chlorgas entspricht auch der Einsatz von Bleichlauge (Javelwasser), einer Lösung von NaClO. Chlorgas Cl_2 reagiert mit Wasser zu $Cl^- + HClO + H^+$ und z.T. weiter zu $H^+ + ClO^-$. Das wirksame Agens ist HClO, das auch in Bleichlauge (NaClO) enthalten ist oder durch Chlorkalk gebildet wird. Chlorkalk wird gelegentlich zur Hygienisierung von Nottoiletten verwendet.

Chlordioxid ClO_2 muss am Ort des Einsatzes hergestellt werden, es hat den Vorteil, dass sich nur wenig unerwünschte Nebenprodukte bilden. Es wird oft als letztes Desinfektionsmittel vor der Einspeisung ins Netz eingesetzt und gewährleistet so einen Netzschutz.

Sterilfiltration wird v.a. in extremen touristischen Situationen angewendet: Filterkörper mit feinstem Filtermaterial halten alle Feststoffe und damit insbesondere auch Krankheitskeime in einem einzigen Aufbereitungsschritt zurück. Solche Kleinstfilter können nur geringe Mengen von hygienisch einwandfreiem Trinkwasser produzieren. Heute kommen in der Wasseraufbereitung auch grosstechnisch zunehmend Membranen zur Anwendung, die mit ihren kleinen Poren geeignet sind Mikroorganismen zurückzuhalten und dadurch ein hygienisches Wasser zu produzieren.

Die Gestaltung von Desinfektionsanlagen ist von vielen Faktoren abhängig: Sie reicht von der einfachen Zudosierung von Chlor oder Bleichlauge zu unverschmutztem Quellwasser (Abb. 9.5) bis zu aufwändigen mehrstufigen Belüftungsanlagen um z.B. das gasförmige Ozon im Wasser zu lösen (Abb. 9.4) oder chemischen Prozessen, in denen das ClO_2 vor Ort produziert und ins Wasser dosiert wird. Die Desinfektion bedingt meist nur kurze Reaktionszeiten (Sekunden bis Minuten), um seine volle Wirkung zu erlangen. Je grösser das Wasserwerk, desto aufwändiger wird die Desinfektion – die Wasserversorgung der Stadt Zürich setzt

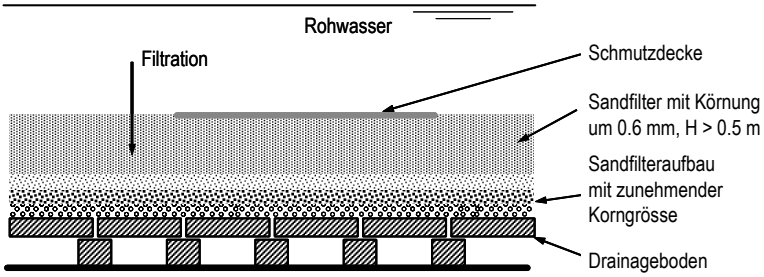

Abb. 9.6. Aufbau eines Langsamsandfilters

sowohl Cl_2 als auch O_3 und ClO_2 ein, wobei in Zwischenstufen z.B. die Nebenprodukte der Chlorung wieder auf Aktivkohle adsorbiert werden.

Beispiel 9.1. Desinfektion mit Chlorgas

Eine kleine Gemeinde mit 2000 Einwohnern muss für ihr Trinkwasser eine Sicherheitschlorung durchführen. Das Ziel ist, im ganzen Verteilnetz eine Restchlorkonzentration von 0.1 g m^{-3} Cl_2 einzuhalten. Die *Chlorzehrung* des Wassers wird in Laborversuchen mit < 0.4 g m^{-3} Cl_2 bestimmt.

Wieviel Chlor braucht die Gemeinde, die pro Tag im Maximum 1000 m^3 Trinkwasser verteilt?

Dosierung = 0.5 g m^{-3} Cl_2 · 1000 m^3 d^{-1} = 500 g d^{-1} Cl_2.

Diese Menge kann in flüssiger Form in Stahlflaschen für viele Tage gelagert werden.

Die *Chlorzehrung* gibt an, wieviel Cl_2 mit Wasserinhaltstoffen reagiert, bevor ein Überschuss für die Desinfektionsreaktionen zur Verfügung steht.

9.2 Langsamsandfilter

Die Langsamfiltration ist ein umfassendes Reinigungsverfahren, das sowohl partikuläre Stoffe und mikrobielle Keime als auch biologisch abbaubare Stoffe zurückhält.

Bereits im 19. Jh. wurden Langsamsandfilter zur Aufbereitung von Trinkwasser betrieben; sie sind die ersten Filterverfahren, die verwendet wurden. Ihr Reinigungsprinzip ist der Bodenpassage nachempfunden (Abb. 9.6):

- *Langsamsandfilter* werden mit Quarzsand mit einer Körnung im Bereich von 0.2–2 mm (typisch sind 0.5–1 mm) und mit einer Schichtstärke von 0.7–1.2 m aufgebaut. Um zu verhindern, dass das Filtermaterial gegen unten ausgeschwemmt wird, wird der Unterbau gegen oben mit abnehmender Korngrösse in mehreren Stützschichten aufgebaut.
- Langsamsandfilter besitzen eine Siebwirkung an der Oberfläche und eine adsorptive Wirkung für Kolloide und Keime über die ganze Filterschicht. Von besonderer Bedeutung für die Reinigungswirkung ist die sogen. *Schmutzdecke*, eine wenige Zentimeter dicke Schicht, die biologisch aktiv ist und in der sowohl Ammonium zu Nitrat oxidiert wird (Nitrifikation), als auch organische

Stoffe mineralisiert (abgebaut) werden. Voraussetzung für eine gute Reinigungswirkung ist eine genügende Versorgung mit Sauerstoff und eine geringe Belastung mit suspendierten Stoffen (Zulauf < 10, besser < 3 g TSS m^{-3}).

– Langsamsandfilter können ein hygienisch einwandfreies und feststofffreies Wasser liefern. Eine Reduktion der totalen Keimzahlen um 3–4 Zehnerpotenzen und der Fäkalkeime um 2–3 Zehnerpotenzen sind typisch.

Langsamsandfilter werden mit einer hydraulischen Belastung von 0.06–0.3 m h^{-1} (m^3 Rohwasser pro m^2 Filterfläche pro Stunde) und einem Überstau von ca. 1 m betrieben. Wird der Energie- oder Druckverlust mit zunehmender Verstopfung zu gross, wird die oberste Schmutzdecke (2–5 cm) abgeschält und der Sand gereinigt (z.B. alle 3–24 Monate je nach Belastung und Vorreinigung des Rohwassers). Anschliessend muss der Filter wieder reifen, d.h. es muss sich eine neue, biologisch aktive Schmutzdecke bilden, was einige Zeit erfordert, während der das produzierte Wasser nicht einwandfrei ist. Langsamsandfilter werden deshalb immer in mehreren Einheiten gebaut – in grossen Anlagen bis zu 5000 m^2 gross, gedeckt oder offen.

Langsamsandfilter haben eine grosse Grundfläche und werden deshalb in Städten kaum mehr neu gebaut. In ländlichen Regionen, insbesondere in Entwicklungsländern sind sie ideale Aufbereitungsverfahren, sofern die Vorbehandlung auf die Rohwasserqualität abgestimmt ist: Die Langsamsandfilter kommen mit einfachen Baumaterialien aus, kennen keine beweglichen Teile, können im Gefälle ohne Fremdenergie betrieben werden, brauchen keine Chemikalien und liefern bei sorgfältigem Betrieb ein hygienisch einwandfreies Wasser. Betrieb und Unterhalt bedingen intensive Handarbeit mit einfachsten Werkzeugen.

Langsamsandfilter haben als Vorbehandlungsstufe von Grundwasser-Anreicherungsanlagen neuerdings wieder einige Bedeutung erlangt: Hier sind grosse Infiltrationsflächen erforderlich, was sich optimal mit der alten Technik verbinden lässt (S.a. Abb. 8.10).

Beispiel 9.2. Dimensionen eines Langsamsandfilters

Wie gross wird ein Langsamsandfilter für eine Stadt mit 100'000 Einwohnern, die pro Tag 50'000 m^3 Wasser aufbereiten muss?

Bei einer Filtergeschwindigkeit von 0.2 m h^{-1} oder 5 m d^{-1} müssen dauernd 10'000 m^2 Filterfläche zur Verfügung stehen.

Damit immer ca. 25% der Filterfläche für den Unterhalt und das Reifen der Schmutzdecke ausser Betrieb genommen werden können, sind insgesamt ca. 10'000 / (100% - 25%) > 13'000 m^2 Filterfläche erforderlich, die mit Vorteil in mindestens 4 Einheiten aufgeteilt werden. Heute wäre häufig bereits die Bereitstellung der entsprechenden Grundstücke kaum möglich.

9.3 Schnellfilter

Die Schnellfiltration hat die Aufgabe, Partikel aus dem Wasser abzutrennen.

Der grosse Flächenbedarf der Langsamsandfilter hat dazu geführt, dass die Filter mit immer höheren hydraulischen Belastungen betrieben wurden. In der Folge verstopften diese Filter nach immer kürzerer Laufzeit, und sie mussten mit einer

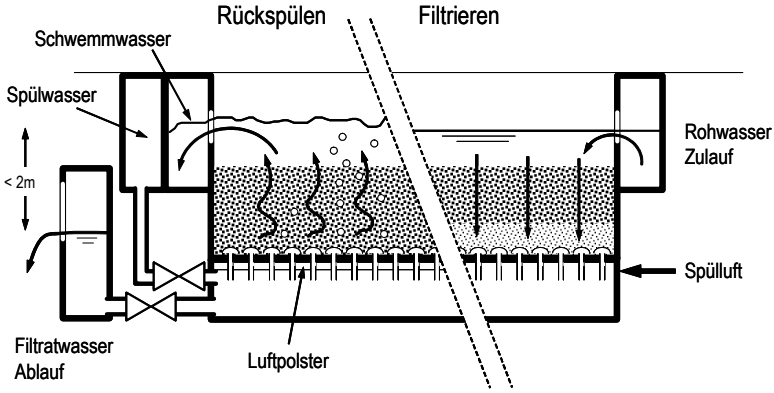

Abb. 9.7. Längsschnitt durch einen Schnellfilter. Rechts in der Phase des Filtrierens, links während der Rückspülung. Das Filterbett ist aus zwei Schichten aufgebaut, oben liegt ein spezifisch leichtes, grobkörniges, unten ein spezifisch schweres, feinkörniges Material. Während der Rückspülung werden die beiden Schichten von Filtermaterial durchmischt.

Rückspülung ausgerüstet werden. Diese erlaubt, die Schmutzstoffe aus dem Filterbett auszuwaschen und dieses zu regenerieren. Anfänglich wurden die Filter mit einer einzigen Schicht Flusssand 0.2–2 mm ausgerüstet und mit nur 1 m h^{-1} beschickt, der Druckverlust stieg sehr schnell an, weil die Filterwirkung v.a. an der Oberfläche zum tragen kam, man spricht von einem *Flächenfilter*. Seit den 60er Jahren werden die Filterbetten von oben nach unten mit abnehmender Korngrösse gebaut, die Filterwirkung kann so besser über die Tiefe des Filterbetts verteilt werden, man spricht von einem *Raumfilter*. Die Zunahme des Druckverlusts wird verringert und entsprechend die Laufzeit bis zur nächsten Spülung stark gesteigert.

Moderne Schnellfilter werden mit Filtergeschwindigkeiten im Bereich von 6–15 m h^{-1} betrieben. Die konstruktiven Details beruhen meist auf dem verfahrenstechnischen „know how“ des Lieferanten. Moderne Filtrationsanlagen werden entsprechend in Zusammenarbeit zwischen beratenden Ingenieuren und Ausrüstern entworfen. Das Wasser filtriert von oben nach unten (Abb. 9.7); die Feststoffe, die im Filter zurückbleiben, führen zu einer laufenden Zunahme des Energieverlusts. Zum Schluss eines Zyklus muss der Filter von unten nach oben rückgespült werden, dazu wird das Filterbett mit Rückspülwasser in Schwebe gebracht, mit Luft aufgelockert und die Feststoffe ausgespült. Da das spezifische Gewicht der grossen Filterkörner kleiner ist als das der kleinen unten liegenden Quarzkörner, schichtet sich das Filterbett automatisch wieder mit von oben nach unten abnehmender Filterkorngrösse. Der nächste Zyklus beginnt.

Für den Aufbau von modernen Mehrschichtfiltern, mit von oben nach unten abnehmender Korngrösse des Filtermaterials, kommen heute Materialien mit unterschiedlicher Dichte zur Anwendung: Quarzsand mit 2.65 g cm^{-3}, Anthrazit oder Blähtongranulat mit 1.7 g cm^{-3} oder Bims mit 1.4 g cm^{-3}. Abbildung 9.8 zeigt die Entwicklung des Aufbaus der Filterschichten in einer modernen Wasseraufbereitungsanlage. Die grobkörnigen Filtermaterialien haben den Vorteil, dass sie mehr Feststoffe speichern können, bevor der Energieverlust stark ansteigt (Abb. 9.9).

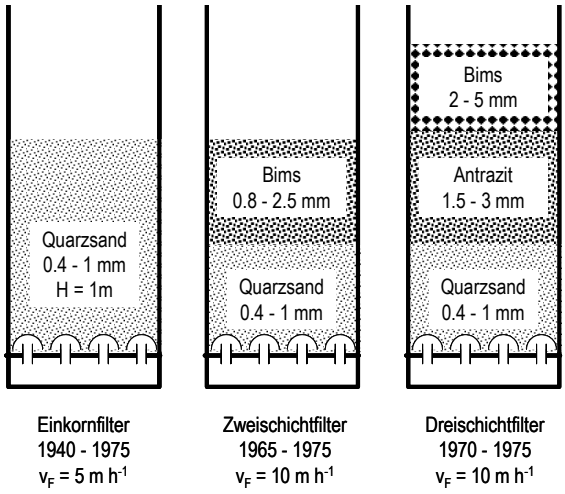

Abb. 9.8. Entwicklung des Filterbetts in den Schnellfiltern der Wasserversorgung der Stadt Zürich. Heute kommen v.a. Zweischichtfilter zur Anwendung. Filtergeschwindigkeit v_F und Korngrösse

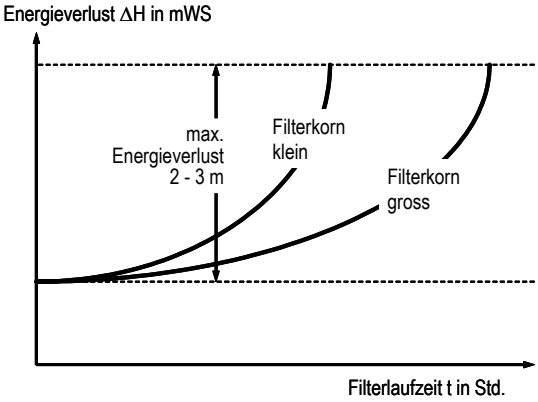

Abb. 9.9. Zeitliche Entwicklung des Energieverlusts des durchströmenden Wassers in einem Filterbett

Das verlängert die Filterlaufzeit und verringert den Bedarf an Rückspülwasser. Die untenliegenden feinkörnigen Schichten gewährleisten eine gute Reinigung des Wassers.

Beispiel 9.3. Dimension einer Schnellfilteranlage

Wie gross werden die Schnellfilter, die für die Vorbehandlung der 50'000 m^3 d^{-1} Wasser in Beispiel 9.2 erforderlich sind?

Die maximale Filtergeschwindigkeit wird zu 10 m h^{-1} angenommen. Im Maximum gehen 5 % des Wassers verloren für Rückspülung und erneute Inbetriebnahme des Filters.

Im Maximum müssen 50'000 · 1.05 = 52'500 m^3d^{-1} Wasser filtriert werden. Dies erfordert 52'500 m^3d^{-1} / (24 h d^{-1}·10 m h^{-1}) = 220 m^2 Filterfläche. Da immer ein Filter zum Rückspülen in Reserve gehalten werden muss, könnten z.B. 6 Zellen mit je 40–45 m^2 gebaut werden.

Beispiel 9.4. Sedimentationsgeschwindigkeiten von Filtermaterialien

Nach Stokes kann die Sedimentationsgeschwindigkeit v_S von kugelförmigen Partikeln im laminaren Strömungsfeld mit der folgenden Gleichung abgeschätzt werden:

$$v_S = \sqrt{3.3 \cdot g \cdot \left(\frac{\rho_S - \rho_W}{\rho_W} \right) \cdot d_S}$$

$g = 9.81\ ms^{-2}$, ρ_S, ρ_W = Dichte des Partikels und des Wassers,
d_S = Partikeldurchmesser.

Damit ergeben sich die folgenden Sedimentationsgeschwindigkeiten für die Materialien im Dreischichtfilter in Abb. 9.8:

Quarzsand:	$\rho_S = 2.65\ g\ cm^{-3}$, $d_S = 0.8\ mm$	$v_S = 0.21\ m\ s^{-1}$
Anthrazit:	$\rho_S = 1.70\ g\ cm^{-3}$, $d_S = 2.0\ mm$	$v_S = 0.21\ m\ s^{-1}$
Bims:	$\rho_S = 1.40\ g\ cm^{-3}$, $d_S = 3.5\ mm$	$v_S = 0.21\ m\ s^{-1}$

Während der Rückspülung sedimentieren diese Filterkörner gegen das aufströmende Rückspülwasser, es kann sich also bei geeigneter Wahl der Kornabstufung eine Trennung der Schichten ergeben. Filterbetten müssen vom Lieferanten des Filtermaterials als Ganzes getestet und verantwortet werden.

9.4 Aktivkohleadsorption

Die Adsorption trennt gelöste, organische Verbindungen aus dem Wasser ab, indem diese an der Oberfläche der Aktivkohle adsorbiert werden.

Aktivkohle oder aktivierte Kohle wird hergestellt, indem z.B. Anthrazit oder Holzkohle bei hoher Temperatur (> 650°C) in Gegenwart von Wasserdampf aktiviert wird, d.h. dass in den graphitischen Strukturen der Kohle mikroskopische Poren entstehen, weil ein grosser Teil der Kohle oxidiert und als CO_2 verflüchtigt wird (Abb. 9.10). Diese mikroskopischen Poren stellen eine grosse innere Oberfläche zur Verfügung (1000–2000 $m^2\ g^{-1}$ Aktivkohle), an die organische Stoffe adsorbieren können. Adsorbieren heisst, dass sich die Stoffe auf der Oberfläche anlagern und dann zusammen mit der Aktivkohle aus dem Wasser entfernt werden können.

Aktivkohle kommt heute meist in Apparaten ähnlich den Schnellfiltern zur Anwendung, die Korngrössen der Aktivkohle sind gleich wie beim Filtermaterial (1–3 mm). Da Aktivkohle teuer ist und beim Rückspülen durch Abrieb immer ein Teil verloren geht, muss das Wasser vor der Aktivkohlefiltration vorbehandelt werden und weitgehend frei von Feststoffen sein.

Die innere Oberfläche der Aktivkohle hat nur eine begrenzte Aufnahmekapazität für organische Stoffe (die zudem stark von den spezifischen Eigenschaften dieser Stoffe abhängt). Ist die Oberfläche belegt und damit die Adsorptionskapazität erschöpft, so muss die Aktivkohle regeneriert werden (in speziellen Aktivierungsöfen, die je nach Lieferant nur im Ausland zur Verfügung stehen).

Die Konzentration von organischen Verbindungen auf der Aktivkohle führt dazu, dass sich Mikroorganismen auf den Kohlekörnern ansiedeln und diese Stoffe z.T. abbauen. Das Adsorptionsverfahren wird dadurch zum biologischen Reinigungsverfahren, das im Notfall grössere Mengen von organischen Verbindungen zurückhalten kann.

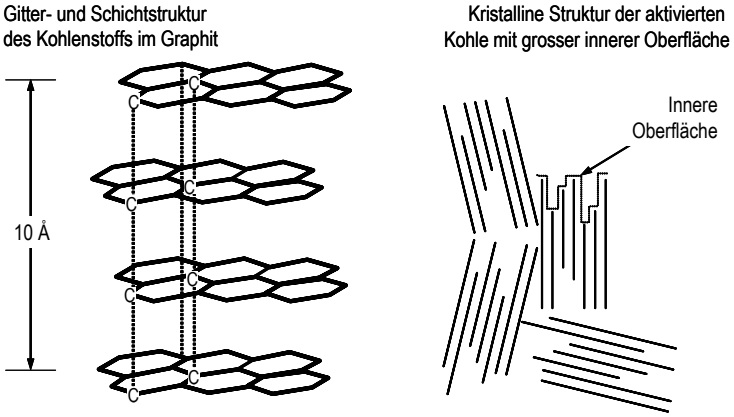

Abb. 9.10. Molekulare und kristalline Struktur der Aktivkohle

Beispiel 9.5. Aktivkohle im täglichen Leben

Aktivkohle kommt in Zigarettenfiltern, Gasmaskenfiltern und als Medizinalkohle zur Anwendung. Immer hat sie die gleiche Aufgabe, sie soll unerwünschte organische Stoffe aus Gasen oder Flüssigkeiten adsorbieren.

Beispiel 9.6. Aktivkohle im Wasserwerk

Die Wasserversorgung der Stadt Zürich betreibt ihre Aktivkohlefilter seit über 15 Jahren ohne Regenerierung der Aktivkohle. Entsprechend der guten Rohwasserqualität genügt der biologische Abbau der organischen Stoffe, um eine ausreichende Adsorptionskapazität der Kohle aufrecht zu erhalten.

9.5 Koagulation und Flockung

Die Flockung ist ein Prozess, der die Abtrennung von feinsten Partikeln aus dem Wasser unterstützt.

Viele der fein suspendierten und kolloidalen Stoffe können nicht durch Sedimentation aus den Rohwasser abgetrennt werden: Die meist elektrisch negativ geladenen Partikel haben geringste Sedimentationsgeschwindigkeit und stossen sich gegenseitig ab, sie bilden dadurch eine stabile Suspension oder ein Kolloid. Mit Hilfe von Chemikalien können die Abstossungskräfte überwunden werden, die kleinen Partikel können sich zu grösseren Aggregaten und Flocken zusammenballen, die nun einfacher aus dem Wasser abgetrennt werden können.

Als Koagulationsmittel wird vor allem Aluminiumsulfat verwendet. Durch die zusätzliche Zugabe von geringen Mengen von Flockungshilfsmitteln (z.B. organische Polymere) kann der Flockungsvorgang noch unterstützt und beschleunigt werden. Die genaue Rezeptur für eine gute Flockung muss im Labor oder in Versuchen erarbeitet werden.

Die Art der Zugabe der Chemikalien (kurzes intensives Mischen) und die Turbulenz, die in den anschliessenden Reaktoren zur Unterstützung der Flockung

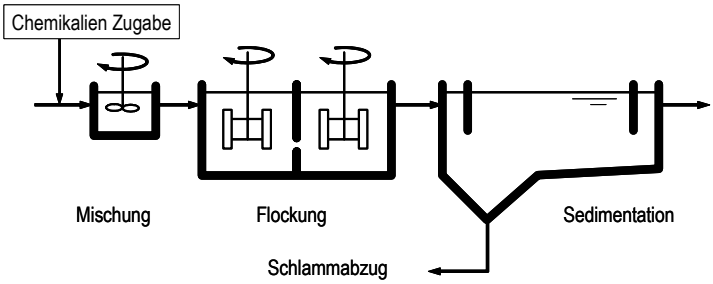

Abb. 9.11. Schematische Darstellung einer Flockung und eines einfachen Sedimentationsbeckens. Die gleiche Anordnung wird auch für die chemische Reinigung von Abwasser eingesetzt (s.a. Abb. 19.9)

während einigen Minuten z.B. durch Paddel erzeugt wird, entscheiden massgebend über den Erfolg der Flockung (Abb. 9.11).

9.6 Sedimentation

Die Sedimentation ist ein Vorbehandlungsverfahren, das einen grossen Teil der partikulären Stoffe abtrennen soll.

Die Sedimentation, oder die Abtrennung von suspendierten Stoffen durch die Schwerkraft, ist ein Verfahrensschritt, der in Nordamerika in der Trinkwasseraufbereitung häufig eingesetzt wird: Die Verwendung von Flockungsmitteln in hoher Konzentration führt zur Bildung einer hohen Konzentration von suspendierten Stoffen, die einen Raumfilter in kurzer Zeit verstopfen würden. Das geflockte Wasser wird deshalb in einer Sedimentation vorbehandelt und erst anschliessend, nun ausgehend von einer geringeren Feststoffkonzentration, filtriert. In Abb. 9.11 ist schematisch ein Sedimentationsbecken dargestellt. Die Aufenthaltszeit im Becken beträgt typisch mehrere Stunden.

Mit Sedimentation allein kann kein Trinkwasser produziert werden. Die verbleibende Restkonzentration der suspendierten Stoffe ist zu hoch und würde insbesondere keine zuverlässige Desinfektion gewährleisten, weil die Chemikalien nur langsam ins Innere der verbleibenden Flocken dringen können und auf diesem Weg ihre Wirkung durch Reaktion verlieren.

Verfahrenstechnisch wird oft in lieferantenspezifischen Anlagen die Flockung und die Sedimentation in einem Bauwerk integriert und mit verfahrenstechnischen Details ergänzt (Abb. 9.12 mit Lamellenabscheider zur Beschleunigung der Sedimentation und Zugabe von Mikrosand zur Beschwerung der Flocken.).

9.7 Mikrosiebe

Mikrosiebe (Abb. 9.13) sind Apparate, in denen ein Stahl- oder Textilgeflecht mit kleinsten Durchlässen im Bereich von 0.016–0.05 mm auf drehende Trommeln aufgespannt ist. Das Wasser fliesst durch das Mikrosieb, dabei bleiben Partikel auf

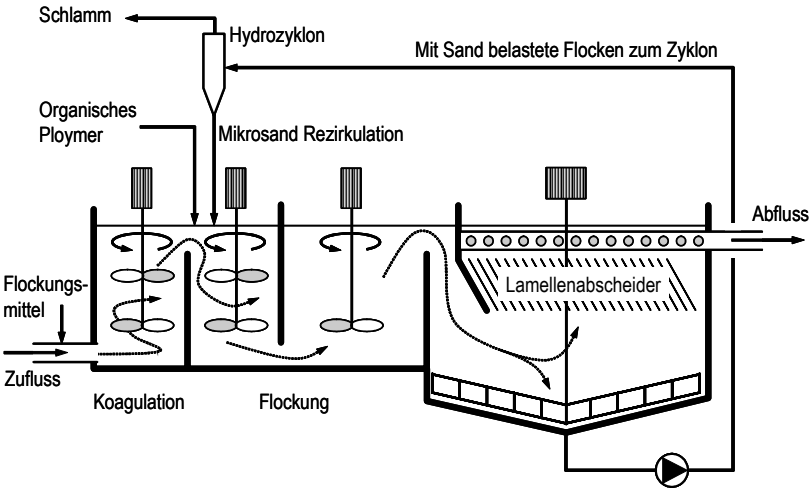

Abb. 9.12. Beispiel einer integrierten Flockungs- und Sedimentationsanlage (nach Actiflow™, Veolia)

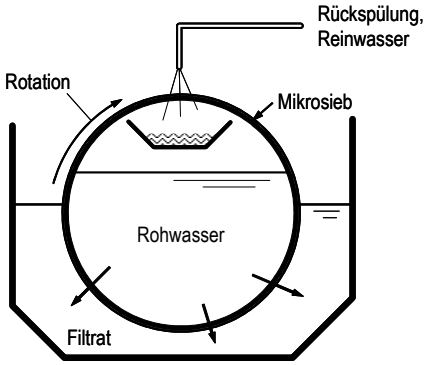

Abb. 9.13. Beispiel eines Mikrosiebes

dem Sieb zurück. Eine kontinuierliche Rückspülung der sich drehenden Trommel sorgt dafür, dass das Sieb nicht verstopft.

9.8 Vorfiltration

Die Vorfiltration ist wie die Sedimentation ein Vorbehandlungsverfahren, das die partikulären Stoffe in einem stark trüben Rohwasser reduzieren soll.

Soll Flusswasser mit stark variablem Gehalt von suspendierten Stoffen mit Filtration oder Langsamfiltration und ev. Grundwasseranreicherung aufbereitet werden, so muss dieses Wasser in einer Vorfiltration behandelt werden, weil die hohen Konzentrationen der suspendierten Stoffe die eigentliche Filtration schnell verstopfen. Die Vorfilter haben eine grosse Speicherkapazität für zurückgehaltene Feststoffe. Ein Beispiel eines solchen Vorfilters ist der horizontal durchströmte

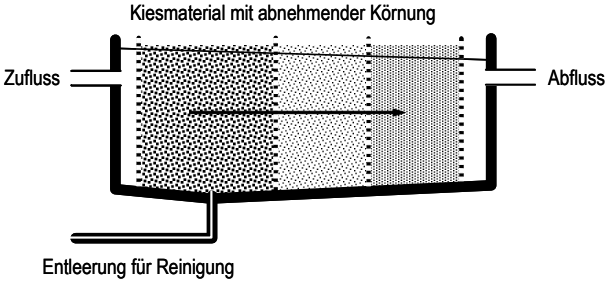

Abb. 9.14. Prinzipskizze eines horizontal durchströmten Kiesfilters, wie er z.B. in Entwicklungsländern zur Vorreinigung von Flusswasser vor Langsamsandfiltern immer häufiger zur Anwendung kommt

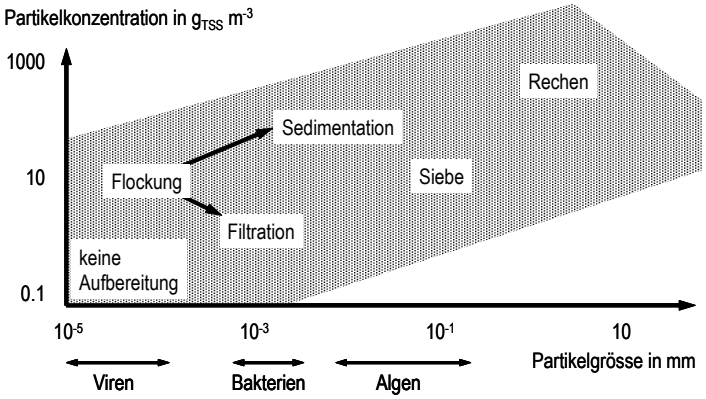

Abb. 9.15. Wirkungsbereich der verschiedenen Prozesse und Verfahren zur Abtrennung von Partikeln aus Rohwasser

Kiesfilter, wie er in Abb. 9.14 dargestellt ist. Solche Filter unterstützen insbesondere die Sedimentation von Partikeln auf den Kieskörnern: Es ergeben sich kurze Sedimentationswege für die Partikel.

9.9 Abtrennung von partikulären Stoffen

Für die Abtrennung von Schwebestoffen aus dem Rohwasser stehen uns viele Verfahren zur Verfügung.

Abb. 9.15 gibt einen Überblick über den Einsatzbereich von unterschiedlichen Verfahren zur Abtrennung von partikulären Stoffen. Häufig werden mehrere Verfahren in Serie betrieben, sodass jede Stufe optimal auf ihre Aufgabe ausgelegt werden kann.

9.10 Entfernung von Eisen und Mangan

Im sauerstoffarmen oder sauerstofffreien Grundwasser kann Eisen- und Mangan-Oxid, das sich im Grundwasserleiter befindet, durch biologische Prozesse zu zweiwertigem Fe^{2+} und Mn^{2+} reduziert werden. Diese reduzierten Schwermetalle haben im Wasser eine hohe Löslichkeit und können entsprechend mit dem Wasser transportiert werden. Kommt das Wasser wieder mit Sauerstoff in Kontakt, wie das z.B. in der Aufbereitung von Grundwasser der Fall ist, so wird zweiwertiges Eisen Fe^{2+} zu dreiwertigem, schwerlöslichem Eisen Fe^{3+} aufoxidiert. Es bildet sich ein rostbrauner Niederschlag, der im Trinkwasser störend ist (und z.B. auf der Wäsche Rostflecken verursacht). Zweiwertiges Mangan Mn^{2+} wird bei den pH-Werten im Trinkwasser nur langsam oxidiert.

Die *Enteisenung* des Wassers ist möglich indem das Eisen in Gegenwart von Sauerstoff zum schwerlöslichen dreiwertigen Eisen aufoxidiert wird und die sich bildenden Niederschläge anschliessend durch Zugabe von Flockungsmitteln entstabilisiert und geflockt werden. Die Flocken können in einem Schnellsandfilter, der mit Vorteil als mehrschichtiger Raumfilter gestaltet ist, abgetrennt werden.

Die *Entmanganung* des Wassers ist ähnlich der Entfernung von Eisen, aber schwieriger: Da die Oxidation zu unlöslichem Mangan nur langsam abläuft, werden z.B. Filtermedien mit katalytischen Oberflächen (MnO_2) eingesetzt, die die Oxidation im Filterbett beschleunigen und dann erlauben, die sich bildenden Niederschläge im Filter zurückzuhalten.

9.11 Entsäuerung

Enthält ein Wasser in Bezug auf das Gleichgewicht zwischen Kalk $CaCO_3$ und Kohlensäure (Kohlendioxid, CO_2) einen Überschuss an Säure (d.h. im Kontakt mit $CaCO_3$ würde das Wasser noch Kalk auflösen können), so hat das Wasser die Tendenz, in Verteilleitungen aggressiv oder korrosiv zu sein. Besteht hingegen ein Überschuss an Ca^{2+} und CO_3^{2-}, so besteht die Tendenz, dass aus dem Wasser Kalk als weisser Niederschlag ausfällt und die Leitungen verkrustet. In der Wasserwerkspraxis wird darauf geachtet, dass Kalk und Kohlensäure angenähert im Gleichgewicht sind. Ein Überschuss von Kohlensäure kann durch mehrere Verfahren vermindert werden (DIN 2000):

- Kohlendioxid kann durch Belüftung aus dem Wasser in die Atmosphäre ausgetrieben werden. Dadurch wird zusätzlich Sauerstoff ins Wasser eingetragen und es werden z.T. andere unerwünschte, schlechtlösliche Gase ausgetrieben.
- Filterung des Wassers über gekörntes Kalziumkarbonat, Kalk, $CaCO_3$, bewirkt, dass Kalk im Wasser aufgelöst wird, bis sich ein Gleichgewicht einstellt. Das Wasser wird aufgehärtet.
- Filterung über dolomitisches Filtermaterial oder andere alkalisch reagierende Filtermaterialien (vorwiegend Gemische aus $CaCO_3$ und MgO).
- Entsäuerung mit Zugabe von Hydroxiden ($Ca(OH)_2$ und NaOH) sowie Soda ($NaCO_3$). Hydroxide heben den pH-Wert des Wassers, das führt zur Umlagerung entsprechend:
  $CO_2 + OH^- \rightarrow HCO_3^-$ und $HCO_3^- + OH^- \rightarrow CO_3^{2-} + H_2O$.

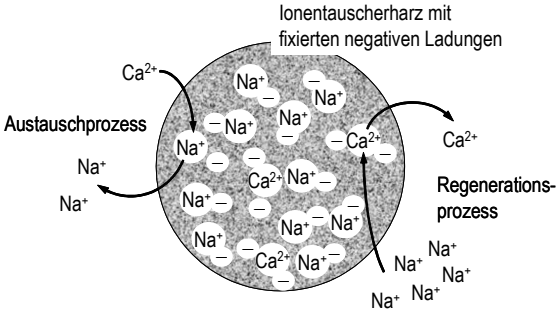

Abb. 9.16: Darstellung eines Ionentauscherharzes: Auf einem organischen Makromolekül sind negative Ladungen fixiert, die anfänglich durch Na^+ neutralisiert werden. Weil Ca^{2+} eine grössere Affinität zu den negativen Ladungen hat, kann es gegen Natrium Ionen ausgetauscht werden

9.12 Enthärtung

Hartes Wasser wird gelegentlich vor der Nutzung als Trinkwasser enthärtet, d.h., dass die Konzentration der härtebildenden Ionen (insbesondere Kalzium Ca^{2+} und z.T. Magnesium Mg^{2+}) reduziert wird. Vor allem in den USA wurden eine Reihe von Verfahren für diese Aufgabe entwickelt, von Bedeutung sind Fällung und Ionenaustausch:

- Die *Fällung* von Calcium Ionen kann erreicht werden, indem das Wasser durch Zugabe von Chemikalien in Bezug auf $CaCO_3$ übersättigt wird. Der Kalk ($CaCO_3$) wird dann in Form von weissen Flocken ausfallen und kann z.B. durch Sedimentation und nachfolgende Filtration eliminiert werden. Die zugegebenen Chemikalien sind abhängig von der Wasserzusammensetzung, in Frage kommen alkalisch wirkende Stoffe: Soda ($NaCO_3$), gebrannter Kalk (CaO) ev. in seiner gelöschten Form ($Ca(OH)_2$), Natronlauge (NaOH) etc. Durch chemische Enthärtung werden dem Wasser meist Salze entzogen, das heisst, dass das enthärtete Wasser weniger Mineralien enthält. Über die chemische Enthärtung gibt es eine umfangreiche amerikanische Literatur.
- Der *Ionenaustausch* bedeutet, dass z.B. Na^+ Ionen, die auf einem Ionentauscherharz fixiert sind, gegen die Ca^{2+} Ionen im Wasser ausgetauscht werden: $2\ Na^+ \leftrightarrow Ca^{2+}$ (Abb. 9.16). Dadurch werden dem Wasser keine Salze entzogen, sondern nur das eine Salz mit dem anderen ersetzt. Ionentauscherharze werden in kleinen Kügelchen (0.5–1.5 mm) geliefert und in Kolonnen gepackt, über die das feststofffreie Wasser geleitet wird. Nach einer gewissen Zeit hat das Harz die anfänglich vorhandenen Na^+ Ionen abgegeben und eine entsprechende Menge Ca^{2+} aufgenommen. Die Austauschkapazität ist erschöpft, und das Harz muss regeneriert werden. Dazu wird eine konzentrierte Lösung von Na^+Cl^- (Kochsalz) über das Harz geleitet, die hohe Konzentration des Na^+ führt zur Umkehr des Ionenaustausch-Prozesses. Es fällt ein Abwasser an, das die Reste der konzentrierten NaCl Lösung enthält, die mit dem zurückgelösten Ca^{2+} verschmutzt ist.

Früher hatte die Enthärtung von Trinkwasser eine grosse Bedeutung, weil die Waschmittel noch nicht mit der natürlichen Härte des Wassers umgehen konnten. Moderne Textilwaschmittel werden so konfektioniert, dass sie auch in hartem Wasser ihre Wirksamkeit entfalten können (z.T. enthalten sie selber Ionentauscher in der Form von Zeolithen). Von Bedeutung ist die Enthärtung des Wassers dort, wo viel heisses Wasser gebraucht wird (die Löslichkeit von $CaCO_3$ nimmt mit zunehmender Temperatur ab) oder wo Wasser z.B. zur Kühlung verdampft wird. In der Kühlung wird nur reines Wasser verdampft, sodass sich die Salze im zurückbleibenden Wasser aufkonzentrieren und dieses mit Kalk übersättigt wird. Zusätzlich wird durch die Belüftung im Kühlturm CO_2 in die Atmosphäre ausgetrieben, sodass der pH-Wert ansteigt.

Wasserenthärtung ist heute primär ein Verfahren, das in der Brauchwasseraufbereitung von Industriebetrieben, Klimaanlagen und Atomkraftwerken (Kühltürme) genutzt wird.

Beispiel 9.7. Wasserenthärtung mit Kalkzugabe

In den USA wird häufig Rohwasser nach dem folgenden Verfahren enthärtet:

Kalk ($CaCO_3$) wird im Steinbruch abgebaut und bei hoher Temperatur zu gebranntem Kalk (CaO) gebrannt:

$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$

Dabei entweicht CO_2 durch den Kamin in die Atmosphäre. Anschliessend wird der gebrannte Kalk mit Wasser zu gelöschtem Kalk ($Ca(OH)_2$) gelöscht, entsprechend

$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$ (dabei wird viel Wärme freigesetzt)

Wird nun der gelöschte Kalk in Form einer Kalkmilch (im Wasser gelöstes $Ca(OH)_2$) dem Wasser zugegeben, so steigt der pH-Wert, aus Bikarbonat (HCO_3^-) wird Karbonat ($CO_3^=$), und das Löslichkeitsprodukt von Kalk ($CaCO_3$) wird überschritten, sodass Kalk ausfällt, der mit Sedimentation aus dem Wasser abgetrennt werden kann:

$Ca(OH)_2 + 2\ HCO_3^- \rightarrow Ca^{2+} + 2\ CO_3^= + 2\ H_2O$ und

$2\ Ca^{2+} + 2\ CO_3^= \rightarrow 2\ CaCO_3 \downarrow$(ausgefällt)

Insgesamt können also pro Mol abgebautem Kalk ein Mol Ca^{2+} und 2 Mol HCO_3^- aus dem Wasser gefällt werden. Zusätzlich wird die Atmosphäre mit einem Mol CO_2 belastet, das beim Brennen des Kalkes entsteht.

Beispiel 9.8. Ionentauscher im Geschirrspüler

Moderne Geschirrspüler enthalten eine Ionentauscherkolonne, in der das letzte Spülwasser enthärtet wird: Na^+ wird gegen Ca^{2+} ausgetauscht. Dadurch wird vermieden, dass sich beim Trocknen Kalkflecken auf dem Geschirr bilden. Gelegentlich muss der Ionentauscher mit Kochsalz NaCl regeneriert werden.

S.a. Beispiel 3.16, Seite 48

9.13 Mehrstufige Aufbereitung: Fallbeispiel Seewasser

Oberflächenwasser wird meistens in mehrstufigen Aufbereitungsverfahren zu Trinkwasser aufbereitet. Die Wahl der Verfahrenskombination ist abhängig von der Qualität des Rohwassers und der Grösse der Anlage.

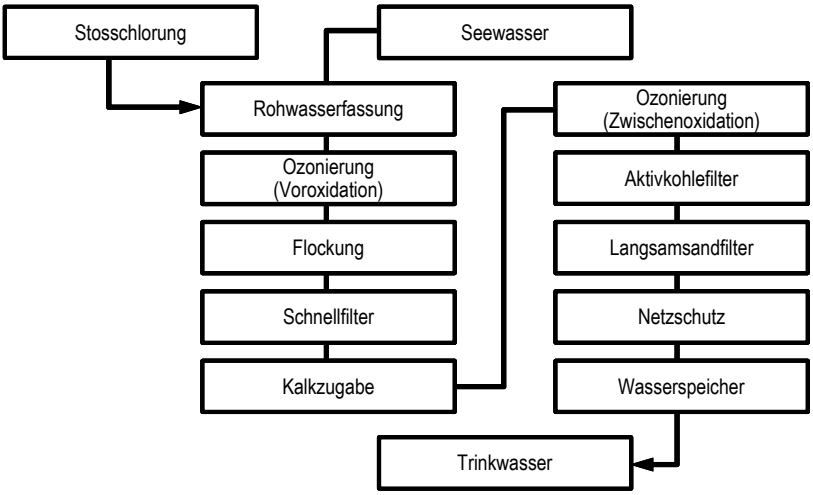

Abb. 9.17. Verfahrensschema der Wasseraufbereitung in den Seewasserwerken der Stadt Zürich

Mehrstufige Aufbereitungsverfahren kommen v.a. dort zum Einsatz, wo Oberflächenwasser zu Trinkwasser aufbereitet werden soll. Im Rahmen dieser Übersicht wird keine umfassende Besprechung der möglichen Verfahrensstufen oder -kombinationen gemacht. Es wird hier nur anhand eines sehr umfassenden Beispiels das Zusammenwirken von mehreren Stufen besprochen.

In den zwei Seewasserwerken der Stadt Zürich kommt das umfassende Verfahren in Abb. 9.17 zur Anwendung:

- Das Seewasser wird in grosser Entfernung vom Ufer in einer Tiefe von 30 m unter dem Seewasserspiegel gefasst. Hier hat das Seewasser über das ganze Jahr eine konstant gute Qualität und eine geringe Temperatur (Tabelle 8.5).
- Seit 1974 wird im Zürichsee die Wandermuschel *Dreissena ploymorpha* (Dreikantmuschel) beobachtet, die vermutlich durch mobile Boote aus anderen Gewässern eingeschleppt wurde. Die Larven dieser Muschel schweben im Seewasser und können sich in der Wasserentnahmeleitung festsetzen und sich aus dem vorbeiströmenden Wasser ernähren. Es entstehen Krusten von Muscheln. Damit diese Muscheln schon als Larven abgetötet werden, wird die Rohwasserfassung einmal pro Monat während 8 h mit einer hohen Konzentration von Cl_2 (10 g Cl_2 m^{-3}) desinfiziert (Stosschlorung).
- Nun wird dem Wasser Ozon zugeführt. Das Ozon reagiert (oxidiert) mit einem Teil der organischen Wasserinhaltsstoffe. Das erleichtert die nachfolgende Flockung. Gleichzeitig wird dem Wasser Sauerstoff zugeführt und es können ev. flüchtige Stoffe aus dem Wasser ausgetrieben werden.
- Mit Hilfe von geringen Mengen von Aluminiumsulfat wird das Wasser nun geflockt. Man spricht hier von einer Mikroflockung und setzt nur geringste Mengen von Chemikalien ein (< 2 g m^{-3}).
- In den Schnellfiltern werden der grösste Teil der partikulären Stoffe und insbesondere die gebildeten Flocken zurückgehalten. Da der Zürichsee eine kon-

stant gute Rohwasserqualität liefert, ist vor der Filtration keine Vorbehandlung erforderlich.

- Durch die Zugabe von geringen Mengen von Kalkmilch ($Ca(OH)_2$) wird das Wasser in Bezug auf die Löslichkeit von $CaCO_3$ ins Gleichgewicht gebracht, sodass es später in den Verteilleitungen nicht korrosiv wirkt.
- In einer zweiten Ozonierung werden gelöste organische Stoffe oxidiert. In der Folge sind diese Stoffe besser biologisch abbaubar, sodass Bakterien diese aus dem Wasser eliminieren können.
- Im nachfolgenden Aktivkohlefilter werden organische Stoffe auf die Aktivkohle adsorbiert und zum grössten Teil von Bakterien, die sich auf der Aktivkohle angesiedelt haben, abgebaut. Die Adsorption stellt gleichzeitig ein Schutz dar, der in Notsituationen organische Verbindungen im Wasser zurückhalten kann, auch wenn diese nicht biologisch abbaubar sind (s. dazu Beispiel 9.9).
- Die nachfolgenden Langsamsandfilter werden eingesetzt, weil sie beim Ausbau der Wasserwerke bereits bestanden haben. Ihr Ablauf hat Trinkwasserqualität und ist hygienisch einwandfrei. Heute würde man keine neuen Langsamsandfilter mehr bauen.
- Als sogen. Netzschutz kann dem Wasser noch Chlordioxid als Desinfektionsmittel zugegeben werden. Ohne Langsamsandfilter ist das erforderlich, damit die hygienische Qualität des Trinkwassers auch im Verteilnetz aufrecht erhalten bleibt. Geringe Restkonzentrationen von organischen Stoffen dienen Bakterien als Nährstoffe und können dazu führen, dass das Wasser im Netz von neuem verkeimt wird. Diese Bakterien siedeln sich in einer dünnen Schicht, einem Biofilm, auf den Wänden der Verteilleitungen an und ernähren sich aus dem vorbeifliessenden Trinkwasser. In den Langsamsandfiltern werden aber diese Nährstoffe soweit abgebaut, dass die Wasserwerke in Zürich auf diesen Netzschutz meistens verzichten können – ein ausgezeichnetes Trinkwasser ist entstanden.

Beispiel 9.9. Phenol im Zürcher Trinkwasser

1967 sind durch eine Fehlmanipulation in einer chemischen Reinigungsanstalt grosse Mengen von Phenol in den Zürichsee eingeleitet worden. Die eingeleitete Flüssigkeit hat sich in der Tiefe der Wasserentnahmestelle der Wasserversorgung der Stadt Zürich eingeschichtet und in dieser Tiefe schnell über den ganzen See verbreitet. Dadurch sind Phenole in die Wasseraufbereitungsanlage gelangt.

Phenol reagiert mit Chlor Cl_2 zu Chlorphenol, das intensiv riecht und das Trinkwasser ungeniessbar macht. In einigen Quartieren der Stadt stand während mehreren Tagen kein Trinkwasser zur Verfügung. (Für Phenole und Chlorphenole gelten strenge Grenzwerte im Trinkwasser).

Die Tatsache, dass das Wasserwerk diesem Unfall kaum gewachsen war, hatte Konsequenzen: Ein neuer Direktor hat den Bau der umfangreichen Aufbereitungsverfahren eingeleitet, die in Abb. 9.17 dargestellt sind. Die Unterstützung durch die Politiker war ihm über lange Zeit sicher.

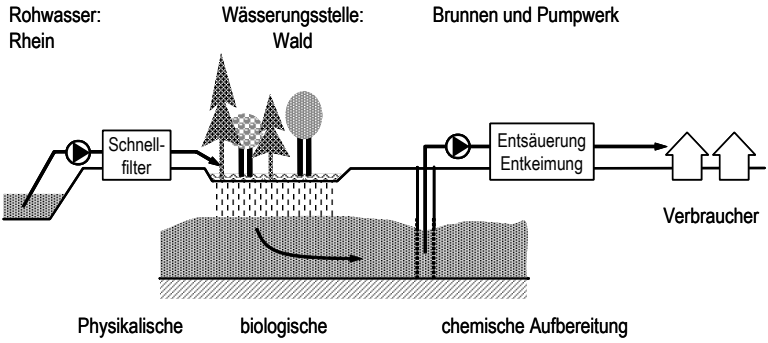

Abb. 9.18: Beispiel einer Flusswasseraufbereitungsanlage,

9.14 Aufbereitung von Flusswasser

Als Folge von Niederschlägen ist Flusswasser starken Qualitätsschwankungen unterworfen. Es ist daher von Vorteil, wenn der direkte Bezug von Flusswasser bei Hochwasser unterbrochen werden kann. Grundwasseranreicherung speichert Wasser im Untergrund und erlaubt die Wasserentnahme zu unterbrechen..

Abbildung 9.18 zeigt schematisch das Aufbereitungsverfahren der Stadt Basel. Rheinwasser wird vorerst filtriert und dann über periodisch beschickte Wässerungsstellen in den Untergrund versickert. Biologische und physikalische Prozesse bereiten das Wasser so auf, dass nach der Förderung das angereicherte Grundwasser zur Sicherheit nur noch desinfiziert werden muss. Der grosse Speicher im Untergrund erlaubt die Wässerung über längere Zeit einzustellen, es muss also nur Wasser mit guter Ausgangsqualität genutzt werden. Eine solche Anlage hat einen grossen Flächenbedarf, nutzt die natürlichen Selbstreinigungsprozesse und kommt mit deutlich weniger anspruchsvoller Technik aus als ein Seewasserwerk wie es in Abb. 9.17 dargestellt ist.

9.15 Membrantechnologie

Als Membran bezeichnen wir in der Wassertechnologie eine dünne Schicht von Material, die geeignet ist Gruppen von Stoffen und Partikeln zurückzuhalten, wenn über die Membran eine treibende Kraft (Druck, elektrisches Feld, Konzentration, ...) angesetzt wird. Membranen werden zunehmend eingesetzt; sie können Mikroorganismen, Viren, partikuläres Material (Trübung), natürliches organisches Material, das den Geruch und Geschmack des Wassers beeinträchtigt oder mit Desinfektionsmitteln reagiert und Ionen zurückhalten. Die Fortschritte sowohl in der Produktion von Membranen als auch in deren verfahrenstechnischen Einsatz sind rasant.

Hier werden Membranprozesse vorgestellt, die auf dem Einsatz eines Druckgradienten über die Membran beruhen. Mit abnehmender Porengrösse sind das:

Mikrofiltration (MF), Ultrafiltration (UF), Nanofiltration (NF) und Umkehrosmose (RO von engl. reverse osmosis).

Membrane werden in unterschiedlicher Geometrie angeordnet, als Platten gestapelt, spiralförmig gewickelt (mit eingelagerten Stützschichten) oder als Bündel von Hohlfasern (Abb. 9.19). Ihre Porengrösse liegt je nach Verfahren im Bereich der Stoffe, die aus dem Wasser abgetrennt werden müssen (Abb. 9.20). Da das Produktwasser mit einer Druckdifferenz durch die Membran gepresst wird, werden alle Stoffe, die grösser sind als die Poren, zurückgehalten und müssen dann als Konzentrat entsorgt werden.

Die Mikro- und Ultrafiltration hält Bakterien und z.T. auch Viren zurück, das entlastet eine nachfolgende Desinfektion. Nanofiltration und Umkehrosmose produzieren ein hygienisch einwandfreies Wasser (mindestens solange die Membran intakt ist).

Membrane haben die Tendenz zu verstopfen (man spricht von „fouling“) und müssen entsprechend rückgespült und regelmässig chemisch behandelt werden. Da NF und RO die chemische Zusammensetzung des Wassers verändern, können hier auch Stoffe ausgefällt werden. Um der Verstopfung vorzubeugen, wird das Wasser vorbehandelt, z.B. durch Sandfiltration oder Siebung, ev. kommt auch Mikrofiltration zum Einsatz.

Membrananlagen können in kleinen Bauwerken untergebracht werden und beanspruchen entsprechend nur wenig Bodenfläche. Die spezifischen Kosten solcher Anlagen nehmen mit abnehmender Grösse nicht sehr schnell zu. Weil sie zudem recht einfach automatisiert werden können eignen sie sich auch für kleine Anwendungen und kommen heute z.T. als fertig montierte Anlagen in Notfällen zur Anwendung. Experten erwarten, dass die Membranverfahren in naher Zukunft zu einem wichtigen Wasseraufbereitungsverfahren werden.

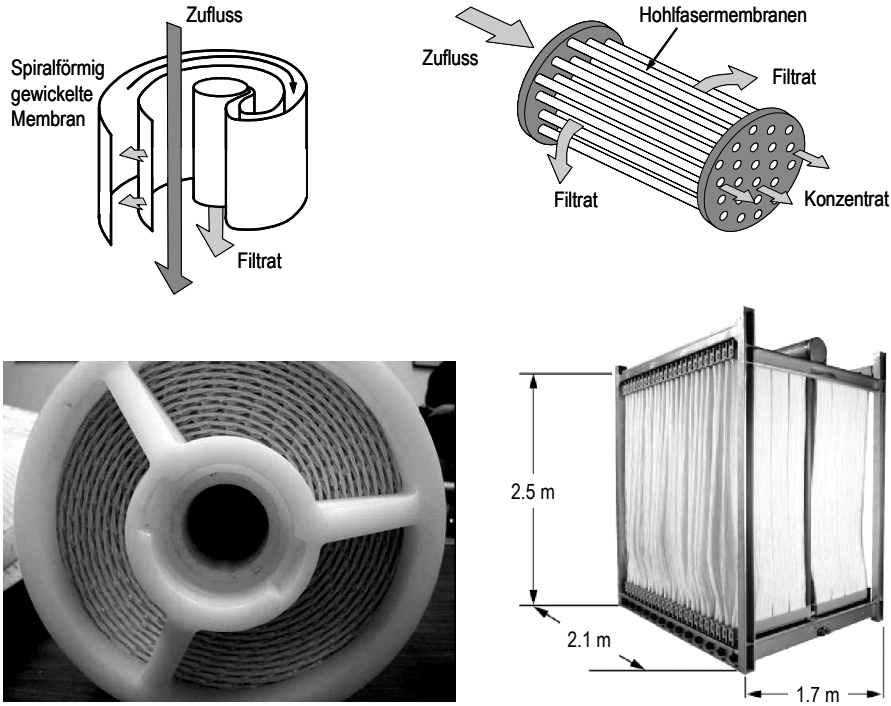

Abb. 9.19: Beispiele von Membranmodulen: Links spiralförmig gewickelte Membran; rechts oben: Hohlfasermembrane, von innen nach aussen durchströmt (Trinkwasser), unten von aussen nach innen durchströmt (Abwasserreinigung)

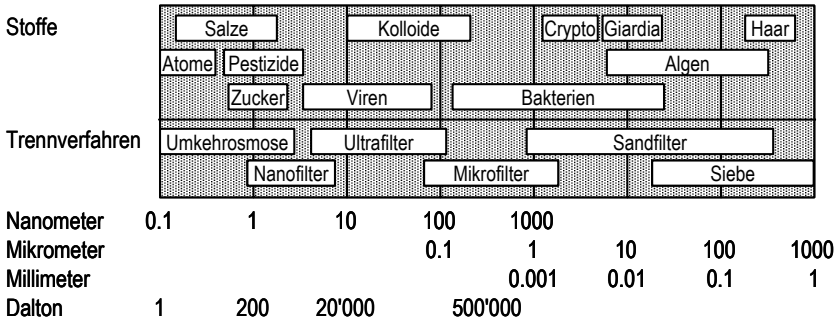

Abb. 9.20: Grössenvergleich der Poren von unterschiedlichen Membranen und Stoffen, die in der Wasseraufbereitung aus dem Rohwasser abgetrennt werden sollen

http://www.springer.com/978-3-540-34329-5

Siedlungswasserwirtschaft
Gujer, W.
2007, XVI, 416 S., Hardcover
ISBN: 978-3-540-34329-5