

Wasseraufbereitung für Dampfsterilisationsprozesse

Wasserchemie, Speisewasseraufbereitung,
Wasserqualität

Lautenschläger Schriftenreihe Band 3

Markus Meurer

Wasseraufbereitung für Dampfsterilisationsprozesse

Wasserchemie - Speisewasseraufbereitung - Wasserqualität

In einem Dampfsterilisationsprozess dient Wasserdampf als Energieträger, durch den das Sterilisiergut an allen äußeren und inneren Oberflächen aufgeheizt und befeuchtet wird. In den allermeisten Anwendungsfällen dürfen dabei sowohl der Dampf als auch das entstehende Kondensat keine Verunreinigungen enthalten, die Rückstände auf dem Sterilisiergut bilden oder sogar den Sterilisator oder das Gut durch Korrosion oder Beläge schädigen können.

In der Energietechnik eingesetzter Heiz- und Prozessdampf ist für Dampfsterilisationsprozesse nicht geeignet, da hier weniger die chemische Reinheit des Dampfes als geringer Verschleiß und niedrige Energieverluste in den Transportleitungen eine Rolle spielen. Dem Kesselwasser werden chemische Hilfsstoffe wie Stabilisatoren und Korrosionsinhibitoren zugesetzt, die sich dann auch im Dampf wiederfinden.

Reindampferzeugungssysteme für die Dampfsterilisation oder Dampfdesinfektion in industriellen Anwendungen, im Labor und im medizinischen Bereich sind dagegen dafür

ausgelegt, hochreinen Sterilisierdampf mit einem Minimum an organischen und anorganischen Verunreinigungen zu erzeugen.

Voraussetzung hierfür ist neben der Werkstoffauswahl und dem konstruktiven Aufbau von Dampferzeuger und Rohrleitungen insbesondere eine geeignete Aufbereitung des Kesselspeisewassers, die chemische Komponenten und Partikel im für die Anwendung erforderlichen Umfang aus dem Rohwasser entfernt.

Die vorliegende Broschüre ist mit dem Ziel verfasst, einen Überblick über wesentliche Grundlagen der Wasserchemie, über Anforderungen an Speisewasser für Dampfsterilisationsprozesse und über marktübliche Verfahren zur Herstellung von Kesselspeisewasser zu vermitteln.

Köln, im Januar 2024

Markus Meurer

Auflage

1. Auflage, Januar 2024

Herausgeber

F. & M. Lautenschläger GmbH & Co. KG
Zum Engelshof 1
50996 Köln
www.lautenschlaeger.net
info@lautenschlaeger.net
+49 (0)221 35 017 0

Rechtliche Hinweise

Alle Inhalte dieser Broschüre insbesondere Texte, Fotografien und Grafiken, sind urheberrechtlich geschützt. Das Urheberrecht liegt, soweit nicht ausdrücklich anders gekennzeichnet, bei der F. & M. Lautenschläger GmbH & Co. KG, Köln. Bitte sprechen Sie uns an, falls Sie die Inhalte dieser Broschüre verwenden möchten.

Diese Broschüre stützt sich auf eigene Untersuchungen, bekanntes Fachwissen sowie allgemein zugängliche Literatur. Die entsprechenden Quellen sind im Text vermerkt, Zitate sind jedoch vielfach gekürzt wiedergegeben. Der guten Ordnung halber weisen wir darauf hin, dass für die Richtigkeit und Vollständigkeit keine Gewähr übernommen wird.

1. Einführung	5
2. Wasserinhaltsstoffe	6
2.1 Reines Wasser.....	6
pH-Wert.....	6
Elektrische Leitfähigkeit.....	6
2.2 Salze.....	6
2.3 Gelöste Gase.....	8
2.4 Wasserhärte.....	9
Temporäre Härte.....	9
Permanente Härte.....	9
2.5 Auswirkungen der Wasserinhaltsstoffe	
auf die Dampfsterilisation.....	10
Nicht kondensierbare Gase.....	10
Beläge und Ablagerungen.....	11
Korrosion.....	12
3. Wasserqualitäten in der	
Dampfsterilisationstechnik	14
3.1 Anforderungen an Brauchwasser.....	14
3.2 Weichwasser.....	14
3.3 Kältewasser.....	15
3.4 Kesselspeisewasser.....	15
3.5 Mantelkühlung.....	16
4. Wasseraufbereitungstechnik	17
4.1 Enthärtung.....	18
4.2 Umkehrosmose.....	18
4.3 Vollentsalzung.....	19
Mischbettpatronen.....	19
Elektro-Entionisierung.....	21
4.4 Lagerung.....	21
4.5 Entgasung.....	22
5. Empfehlungen für die VE-Wasser-	
Herstellung und das Abschlämmen von	
Reindampferzeugern	23
6. Empfehlungen für die Probenahme	24
Weiterführende Informationen.....	25
Weiterführende Literatur.....	25
Der Autor.....	25
Der Herausgeber.....	25
Wasserdampftabelle.....	26

1. EINFÜHRUNG

Wasser begegnet uns überall in unserer Welt. Je nach Herkunft eines Wassers unterscheidet man beispielsweise Quellwasser, Meerwasser, Gletscherwasser, Regenwasser, Oberflächenwasser oder Grundwasser. Und abhängig vom Verwendungszweck benennen wir Wasser als Trinkwasser, Prozesswasser, Kühlwasser, Weichwasser oder auch Bügelwasser.

Wasser ist nicht einfach Wasser - unabhängig von seiner Herkunft und der vorgesehenen Verwendung besteht jedes dieser Wässer zunächst natürlich fast ausschließlich aus reinem Wasser (H_2O). Zusätzlich finden sich aber immer auch weitere Inhaltsstoffe natürlichen Ursprungs oder künstlich zugesetzte Komponenten, die die physikalischen, chemischen oder elektrischen Eigenschaften eines Wassers deutlich verändern können. Zu diesen charakteristischen Eigenschaften zählen insbesondere die Wasserhärte, der pH-Wert, der Abdampfdruck, die Viskosität, Farbe und Trübung oder die elektrische Leitfähigkeit.

In Dampfsterilisationsprozessen wird Wasser sowohl zu Kühlzwecken als auch zur Erzeugung des Sterilisierdampfes benötigt. Diese Broschüre beleuchtet die für die Dampfsterilisation im industriellen und medizinischen Umfeld wichtigsten Themenfelder aus dem Bereich der Wasserchemie und Auswirkungen von Wasserinhaltsstoffen auf den Betrieb von Dampfsterilisatoren. Hierbei stehen vor allem die Reinheitsanforderungen an das Sterilgut und den Sterilisierdampf, aber auch die Bildung von Ablagerungen und Belägen wie Kesselstein oder Kalk sowie Korrosionseffekte im Dampferzeuger und Sterilisator oder auf dem Sterilisiergut im Vordergrund.

Moderne Dampfsterilisatoren arbeiten in drei Phasen: einem Aufheisschritt, der Haltezeit, in der das Sterilisiergut der Sterilisiertemperatur ausgesetzt ist und einem abschließenden Kühl- und Trocknungsschritt. Das in diesem abschließenden Kühschritt eingesetzte Kühlmittel ist in aller Regel Wasser. Je nach Prozessführung wird dieses Kühlwasser in einem geschlossenen Kreislauf geführt oder nach der Erwärmung im Sterilisator in den Abfluss geleitet und verworfen.

Hierbei kommt das Kühlmedium jedoch nicht in Kontakt mit dem Sterilgut. Dementsprechend ist bei der Festlegung der erforderlichen Wasserqualität nur zu beachten, dass Wasserinhaltsstoffe nicht zu Schäden oder erhöhtem Verschleiß am Kühlsystem führen dürfen. Kapitel 3 gibt für die in Dampfsterilisatoren üblichen Varianten von Kühlsystemen Hinweise zur erforderlichen Wasserqualität.

Sind im Speisewasser für die Erzeugung von Sterilisierdampf Verunreinigungen enthalten, gelangen diese in den Dampfkessel und von dort unter Umständen mit dem Sterilisierdampf auch in den Sterilisator, wo sie auf das Sterilisiergut übertragen werden können. Aufkonzentrierte Verunreinigungen können darüber hinaus im Kessel, im Sterilisator oder auf dem Sterilisiergut zu Ablagerungen, Belägen und im schlimmsten Fall zu irreparablen Schäden, beispielsweise durch Korrosion, führen.

Um das Speisewasser und die nachgeschalteten Dampfversorgungssysteme als Quelle solcher Verunreinigungen auszuschalten, wird daher in Dampfsterilisationsprozessen üblicherweise ein hochreines Wasser, das möglichst frei von NebenkompONENTEN ist, als Speisewasser für die Sterilisierdampferzeugung verwendet. Der hieraus erzeugte Rein- oder Reinstdampf enthält so geringe Restverunreinigungen, dass sich keine Rückstände auf dem Sterilisiergut bilden.

Für medizinische Anwendungen gibt EN 285 Grenzwerte für die Leitfähigkeit, den pH-Wert und die Konzentration kritischer Komponenten wie Silizium, Chlorid und weitere Metall- und Schwefelverbindungen im Speisewasser und im Dampfkondensat an. Für Sterilisationsanwendungen mit höheren Reinheitsanforderungen, wie sie beispielsweise in der pharmazeutischen Industrie vorkommen, muss die chemische Zusammensetzung des Speisewassers gesondert spezifiziert werden. Allgemeingültige normative Vorgaben existieren nicht.

In der Vergangenheit war es üblich, für Dampfsterilisationsanwendungen mit geringen Reinheitsanforderungen wie der Abfalldesinfektion im Labor oder der Sterilisation von Krankenhausabfällen Heizdampf als Sterilisationsmedium zu verwenden. Heizdampf wird nicht aus hochreinem Wasser gewonnen sondern aus chemisch konditioniertem und stabilisiertem Speisewasser. Auch wenn diese Technik noch in einigen Bestandsanlagen anzutreffen ist, kommt sie bei Neuinstallationen in aller Regel nicht mehr zum Tragen und wird daher in dieser Broschüre nicht behandelt.

2. WASSERINHALTSSTOFFE

Jedes natürlich vorkommende oder technische Wasser enthält Nebenbestandteile und Fremdstoffe. Die Konzentration bzw. Menge dieser Komponenten bestimmt das Aussehen, den Geschmack und die Eigenschaft für technische Prozesse.

Viele Stoffe lösen sich in Wasser nicht auf und vermischen sich auch nicht vollständig mit Wasser. Man findet sie als wasserunlösliche Feststoffe (z.B. Partikel, Schlamm, Biomasse) oder als wasserunlösliche Flüssigkeitstropfen (z.B. Öle) im Wasser wieder, wobei sie in höheren Konzentrationen nicht mehr gleichmäßig als feine Teilchen oder Tröpfchen im Wasser verteilt sind, sondern eine zweite Phase wie einen Ölfilm auf der Wasseroberfläche oder einen festen Bodensatz bilden können.

Wasserlösliche Stoffe wie Luftgase (Stickstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid, Edelgase, usw.), Salze, die sich im Wasser auflösen (dissoziieren), Säuren oder bestimmte Eisenverbindungen sind nicht als Fremdkörper oder separate Phase im Wasser wahrnehmbar. Die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Wassers verändern sich durch diese Nebenbestandteile jedoch unter Umständen drastisch.

2.1 Reines Wasser

Wasser ist ein Molekül, das aus zwei Atomen Wasserstoff (Symbol: H = lat. Hydrogenium) und einem Atom Sauerstoff (Symbol: O = lat. Oxygenium) besteht. Die Summenformel lautet also H_2O .

In der Gasphase - als Wasserdampf - ist dieses Molekül sehr stabil. In der flüssigen Phase - als flüssiges Wasser - zerfällt jedoch ein sehr kleiner Teil der Wassermoleküle in zwei Teile, ein negativ geladenes OH^- -Teilchen und ein positiv geladenes H^+ -Teilchen:



Ein solcher Zerfallsvorgang heißt Dissoziation (bei Wasser auch Autoprotolyse bzw. Eigendissoziation), wobei die positiv und negativ geladenen Teilchen als Ionen bezeichnet werden. Die Konzentration dieser Ionen in reinem Wasser ist äußerst gering. Sie beträgt nur 10^{-7} mol/l, was etwa einem Verhältnis zwischen Ionen und Wassermolekülen von 1 zu einer Milliarde entspricht.

Reines Wasser wird als neutral bezeichnet, d.h. es ist weder sauer noch alkalisch. Wie sauer oder alkalisch eine wässrige Lösung ist, beschreibt der **pH-Wert**. Er ist definiert als der negative dekadische Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration:

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$$

Für reines Wasser mit einer Wasserstoffionen-Konzentration von 10^{-7} mol/l ergibt sich demnach ein pH-Wert von 7.

Säuren zeichnen sich durch eine hohe Konzentration an H^+ -Ionen aus und haben dementsprechend einen pH-Wert, der kleiner als 7 ist. Laugen haben dagegen einen pH-Wert größer 7. Der pH-Wert von Essig (verdünnte Essigsäure) ist beispielsweise etwa 2,5. Stark verdünnte Natronlauge hat einen pH-Wert von über 10.

Auch wenn nur sehr wenige Wassermoleküle in ihre Ionen zerfallen, ist die Dissoziation des Wassers messbar. Damit Wasser elektrischen Strom leiten kann, müssen elektrische Ladungsträger, also Ionen, vorhanden sein. Je höher der Anteil der Ionen im Wasser ist, desto besser leitet das Wasser den Strom.

In reinem Wasser stehen für den Stromfluss nur die wenigen bei der Autoprotolyse entstehenden H^+ - und OH^- -Teilchen zur Verfügung. Die **elektrische Leitfähigkeit** von reinem Wasser ist daher sehr gering. Sie liegt bei nur etwa $0,05 \mu\text{S}/\text{cm}$. Sind im Wasser jedoch weitere Komponenten wie beispielsweise Salze (vgl. Abschnitt 2.2) enthalten, die in ihre Ionen zerfallen, steigt die Leitfähigkeit merkbar an. Die Leitfähigkeit gibt damit einen ersten Hinweis darauf, wie hoch die Konzentration der Wasserinhaltsstoffe insgesamt ist. Es lässt sich jedoch nicht feststellen, welche Inhaltsstoffe für die Leitfähigkeitserhöhung verantwortlich sind.

Die Messung von Leitfähigkeit oder pH-Wert ist nicht trivial. Aufgrund der sehr geringen Ionenkonzentrationen sind zum einen hochgenaue und sehr sensible Messgeräte erforderlich. Schon kleine Fehler in der Handhabung können zu völlig falschen Messergebnissen führen. Zum anderen kann das Messergebnis nur so gut wie die Probenahme sein. Bei einer unsauberen Probenahme können geringste Verunreinigungen in den Probenahmegefäßen oder im Probenahmeequipment gravierende Fehler verursachen (vgl. Kapitel 6).

2.2 Salze

Salze sind Stoffe, die sich aus positiv geladenen Teilchen (Kationen) und negativ geladenen Teilchen (Anionen) zusammensetzen und in ihrer Reinform oft als kristalliner Feststoff vorliegen. Der Zusammenhalt der Strukturen beruht auf den sehr starken elektrostatischen Bindungen zwischen den negativ geladenen und den positiv geladenen An- und Kationen, der sogenannten Ionenbindung. Die positiv geladenen Kationen werden häufig von Metallen, die Anionen oft durch Nichtmetalle und deren Oxide

gebildet. Das bekannteste Beispiel ist Kochsalz, das Natriumchlorid (NaCl). Es besteht aus einem positiv geladenen Natrium-Ion (Na^+) und einem negativ geladenen Chlorid-Ion (Cl^-). Andere aus dem Alltag bekannte Salze sind Calciumcarbonat (Kalkstein, Kreide), Kaliumnitrat (Pökelsatz/Dünger), Calciumsulfat (Gips) oder Natriumsulfat (Glaubersalz).

Viele Salze sind in Wasser löslich. Das Salz zerfällt dabei in seine Ionen, es dissoziiert. Am Beispiel Kochsalz ergibt sich die folgende Reaktionsgleichung:



Die Dissoziation der Salze erfolgt in der Regel vollständig, das heißt, dass man in der wässrigen Salzlösung nach der Einstellung des Gleichgewichts (also nach dem Umrühren) keine Salzkristalle mehr sehen kann.

Diese vollständige Dissoziation der Salze in Wasser ist jedoch begrenzt. Erhöht man die Salzmenge im Wasser immer weiter, ist bald ein Punkt erreicht, an dem sich keine weiteren Salz-Ionen im Wasser frei bewegen können. Das Salz löst sich nicht mehr auf und setzt sich daher in seiner kristallinen Form als Bodensatz ab. Diese maximale Konzentration an dissoziiertem Salz wird als Löslichkeit bezeichnet.

Die Löslichkeit eines Salzes ist eine Stoffeigenschaft, die sich für die verschiedenen Salzarten unterscheidet. Sie ist dabei meist nur in sehr geringem Umfang druckabhängig, zeigt jedoch oft eine deutliche Temperaturabhängigkeit. Die intuitive Annahme, Salze lösten sich mit steigenden Temperaturen zunehmend besser, ist für viele Salze korrekt (z.B. Kaliumnitrat), es gibt jedoch auch Salze, deren Löslichkeit nahe-

zu temperaturunabhängig ist (z.B. Kochsalz). Einige Salze zeigen bei steigender Temperatur sogar eine sinkende Löslichkeit (z.B. Natriumsulfat).

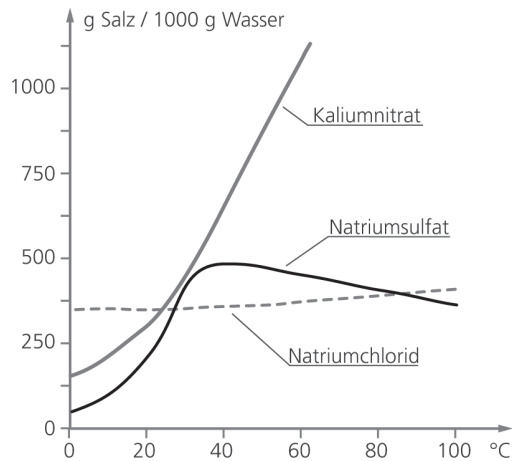


Bild 2: Löslichkeit von Salzen [nach BIER97]

Sind in einem Wasser mehrere Salzarten gelöst, verteilen sich die An- und Kationen aller vorhandenen Salze statistisch, also vollkommen gleichmäßig. Es ist nicht mehr feststellbar, welches Kation ursprünglich zu welchem Anion gehört hat. Ändern sich der pH-Wert oder die Temperatur oder erhöht sich die Salzkonzentration durch verdampfendes Wasser, fällt diejenige Kombination aus Anionen und Kationen aus, deren Löslichkeit zuerst überschritten wird, unabhängig davon, ob diese Salzart ursprünglich dem Wasser zugegeben wurde.

Die im Wasser enthaltenen frei beweglichen Anionen und Kationen der Salze erhöhen die **Leitfähigkeit** des Wassers. Je höher die Salzkonzentration ist, desto besser wird die Leitfähigkeit. Für die meisten Salze ist dieser Zusammenhang bei niedrigen Konzentrationen in erster Näherung linear. Darüber hinaus ist die Leitfähigkeit temperaturabhängig. Mit steigender Wassertemperatur sinkt die Viskosität der Lösung ab, so dass sich die enthaltenen Ionen schneller bewegen können. Dementsprechend steigt die Leitfähigkeit des Wassers an.

Verschiedene Salzarten wirken sich jedoch unterschiedlich stark auf die Leitfähigkeit aus. Zum einen ist die Leitfähigkeit bei gegebener Konzentration für diejenigen Ionensorten größer, die eine höhere Ladungsmenge transportieren. Ca^{2+} -Ionen erzeugen eine höhere Leitfähigkeit als Na^+ -Ionen.

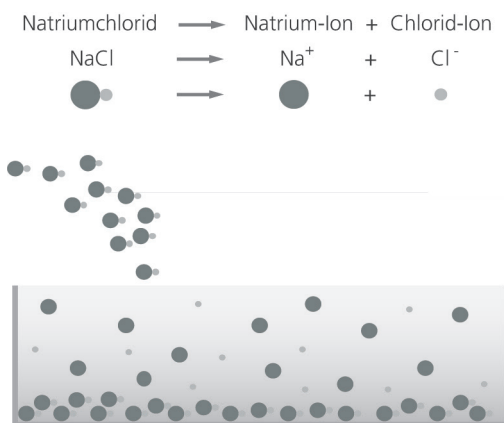


Bild 1: Dissoziation von Salzen

Zum anderen hat die Größe der Ionen einen Einfluss auf die Leitfähigkeit. Wassermoleküle sind zwar insgesamt elektrisch neutral, haben aber aufgrund der gebogenen Form des Moleküls positiv und negativ geladene Teilbereiche. Diese Polarität führt zu Wechselwirkungen mit den Ionen der Salze. Das Wasser bildet sogenannte Hydrathüllen um die Salz-Ionen, die umso größer sind, desto kleiner das Ion ist. Kleine Salz-Ionen haben daher größere Hydrathüllen, wodurch sie sich im Wasser nicht so leicht bewegen können, was im Vergleich zu größeren Ionen wiederum zu einer geringeren Leitfähigkeit führt. Die elektrische Leitfähigkeit des Wassers wird in Siemens pro Meter (S/m) gemessen. Für kleine Konzentrationen und dementsprechend geringe Leitfähigkeiten verwendet man die Einheit Mikrosiemens pro Zentimeter ($\mu\text{S}/\text{cm}$), wobei

$$1 \text{ S/m} = 10.000 \mu\text{S}/\text{cm}$$

2.3 Gelöste Gase

Eine homogene Mischung zweier Stoffe wird chemisch als Lösung bezeichnet. Luftgase wie Sauerstoff, Stickstoff oder Kohlendioxid lösen sich gut in Wasser. Kommt Wasser, in dem keine oder nur wenig Gase gelöst sind, mit Luft in Kontakt, diffundieren zusätzliche Luftgase in das Wasser, bis dessen Aufnahmefähigkeit erschöpft ist. Dabei ist die Löslichkeit der verschiedenen Luftkomponenten jedoch unterschiedlich hoch. Sie ist darüber hinaus druck- und temperaturabhängig. Je höher der Druck und je niedriger die Temperatur, desto mehr Gas löst sich im Wasser.

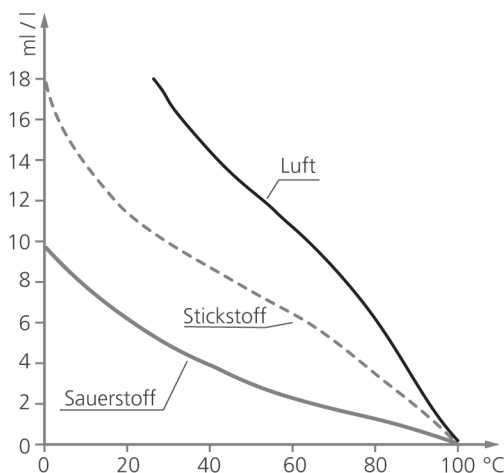


Bild 3: Löslichkeit von Luftsauerstoff und Stickstoff in Wasser bei Umgebungsdruck

Umgebungsluft besteht zu etwa 78% aus Stickstoff (N_2), zu 21% aus Sauerstoff (O_2), zu 1% aus Argon (Ar) und zu 0,04% aus Kohlendioxid (CO_2). In Kontakt mit Umgebungsluft lösen sich bei Umgebungsdruck bis zu 10 ml gasförmiger Sauerstoff und 18 ml Stickstoff in einem Liter reinem Wasser (vgl. Bild 3, Werte rechnerisch abgeleitet aus [AGFW17]). Die Angabe in ml bezieht sich hierbei auf 20°C bei Umgebungsdruck. Mit steigender Temperatur nimmt die Löslichkeit stark ab. Bei der Siedetemperatur von Wasser (100°C bei Umgebungsdruck) verdampft das Wasser zusammen mit den Gasen. Die Löslichkeit bei 100°C ist dementsprechend 0.

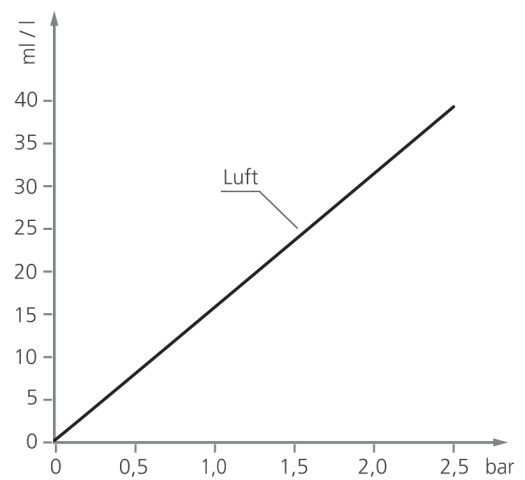


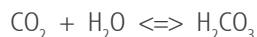
Bild 4: Löslichkeit von Luft in Wasser bei 40°C

Es ist leicht nachvollziehbar, dass sich bei steigendem Druck mehr Gas in Wasser löst, da das Gas aus der Umgebung mit mehr Kraft in das Wasser hineingedrückt wird (Bild 4). Umgekehrt perlt in Wasser gelöstes Gas aus der Wasserphase heraus, wenn man den Druck verringert (Beispiel: Öffnen einer Sprudelflasche).

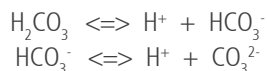
Als technische Anwendung dieser Beobachtungen haben sich als Entgasungsverfahren in der Wasseraufbereitung die thermische Entgasung bei Temperaturen knapp unter dem Siedepunkt des Wassers sowie Vakuumentgasungsverfahren durchgesetzt.

Während sich die Luftbestandteile Sauerstoff, Stickstoff und die Edelgase (Argon, Krypton, Xenon, usw.) in Wasser lösen und auch wieder ausgasen, ohne ihre chemische Struktur zu verändern, geht Kohlendioxid eine Reaktion mit Wasser ein. Kohlendioxid ist ein Oxid des Nichtmetalls Kohlenstoff

und bildet beim Einleiten in Wasser wie alle Nichtmetalloxide eine Säure, die Kohlensäure:



In neutralem Wasser reagieren nur etwa 0,2% der Kohlendioxid-Moleküle zu Kohlensäure, das restliche Kohlendioxid bleibt ohne chemische Veränderung als Gas im Wasser gelöst. Die so entstandene Kohlensäure reagiert in zwei Schritten weiter zu Hydrogencarbonat (HCO_3^-) und Carbonat (CO_3^{2-}).



Alle drei Reaktionen laufen jedoch nicht vollständig ab. Kohlensäure ist daher auch nur schwach sauer. Das Reaktionsgleichgewicht und der Grad der Dissoziation ist dabei stark vom pH-Wert der wässrigen Lösung abhängig. Gibt man Säure in kohlendioxidhaltiges Wasser sinkt der pH-Wert und das Gleichgewicht verschiebt sich in Richtung des gasförmigen Kohlendioxids. Bei hohen pH-Werten entstehen vermehrt Hydrogencarbonat und Carbonat. Dieses Verhalten wird als Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht bezeichnet.

Die Löslichkeit von Kohlendioxid in Wasser ist darüber hinaus genauso temperatur- und druckabhängig wie die Löslichkeit anderer Gase. Je niedriger die Temperatur und je höher der Druck, desto mehr Kohlendioxid kann in Wasser gelöst werden.

Insgesamt ist die Löslichkeit von Kohlendioxid aber um ein vielfaches größer als die anderer Luftgase. So kann man beispielsweise bei 30°C und 1 bar etwa 1300 mg Kohlendioxid in einem Liter Wasser lösen, aber nur etwa 15 mg Stickstoff. Aus diesem Grund kann trotz des sehr geringen Kohlendioxid-Anteils in der Umgebungsluft die insgesamt gelöste Menge an Kohlendioxid in einem Wasser, das mit Luft in Kontakt steht, nicht vernachlässigt werden.

2.4 Wasserhärte

Kohlendioxid aus der Umgebungsluft löst sich in Regen- und Oberflächenwasser und bildet dabei Kohlensäure (vgl. Abschnitt 2.3). Fließt dieses Wasser durch Gesteinsschichten wie Kalkstein, Kreide oder Dolomit, die Calciumcarbonat (CaCO_3) oder Magnesiumcarbonat (MgCO_3) enthalten, wandelt die Kohlensäure die wasserunlöslichen Carbonate in gut lösliche Hydrogencarbonate um und löst damit Magnesium- und Calciumcarbonat aus dem Gestein.



Gipshaltige (CaSO_4) Bodenschichten tragen ebenfalls zu einem Anstieg der Calciumionen-Konzentration im Wasser bei.

Erhitzt man ein solches Wasser, das mit Calcium- und Magnesiumhydrogencarbonat angereichert ist, wird Kohlendioxid ausgetrieben. Um das fehlende Kohlendioxid auszugleichen, wandeln sich Calcium- und Magnesiumhydrogencarbonat wieder in Wasser, Kohlendioxid und die schwer löslichen Carbonate um, die dann als Calcium- und Magnesiumcarbonat ausfallen. Dieses Phänomen ist aus jedem Wasserkocher bekannt. Es entsteht eine weiße Ablagerung, die als Kalk oder in Dampferzeugern als Kesselstein bezeichnet wird.

Als Maß für die Konzentration der Erdalkali-Ionen (insbesondere Calcium- und Magnesium-Ionen) in einem Wasser und die Intensität der Kesselsteinbildung hat sich die Wasserhärte etabliert. Die Gesamthärte setzt sich zusammen aus der temporären Härte bzw. Carbonathärte und der permanenten Härte.

Die **temporäre Härte** wird durch Hydrogencarbonat-Ionen verursacht. Wenn Wasser mit temporärer Härte erhitzt wird, bildet sich Kesselstein und das verbleibende Wasser wird weicher.

Als **permanente Härte** bezeichnet man die Konzentration an Erdalkali-Ionen, die durch Calcium- bzw. Magnesiumsulfat, -nitrat oder -chlorid verursacht wird. Sie kann nicht einfach durch Erhitzen entfernt werden.

Die Maßeinheit für die Wasserhärte ist Mol pro Liter. Das Mol ist eine der Grundeinheiten des SI-Einheitensystems und bezeichnet ca. $6,022 \times 10^{23}$ Teilchen eines Stoffes. Die Einheit Mol pro Liter bzw. mmol/l für die Wasserhärte bezeichnet damit die Anzahl Erdalkali-Ionen, die in einem Liter Wasser gelöst ist. Neben der offiziellen Einheit Mol pro Liter ist die Angabe der Gesamthärte in Härtegraden etabliert. In Europa sind das Grad deutscher Härte (°dH), das Grad englischer Härte (°e), das französische Grad (°fH) und das russische Grad (°rH) üblich.

	Einheit	Umrechnung 1 mmol/l =
deutsche Härte	°dH	5,6
englische Härte	°e	7,02
französische Härte	°fH	10
SI-Einheit	mmol/l	1

Tabelle 1: Maßeinheiten der Wasserhärte

Das Grad deutscher Härte, wurde definiert als die Menge an Erdalkali-Ionen, die 10 mg Calciumoxid pro Liter Wasser entspricht.

Wasser wird oft vereinfachend als weich, mittel, hart oder sehr hart bezeichnet. Die Einteilung in solche Härtebereiche ist nicht für alle europäischen Staaten und Anwendungen gleich. In Deutschland gibt z.B. das Gesetz über die Umweltverträglichkeit von Wasch- und Reinigungsmitteln [WRMG07] drei Härtebereiche für Trinkwasser vor.

Härtebereich	Wasserhärte [°dH]
weich	0 - 8,4
mittel	8,4 - 14
hart	> 14

Tabelle 2: Härtebereiche von Trinkwasser [WRMG07]

2.5 Auswirkungen der Wasserinhaltsstoffe auf die Dampfsterilisation

Reindampf für die Sterilisation soll hochreiner Satt-dampf sein, der frei von Verunreinigungen und Zusatzkomponenten ist. Es ist daher offensichtlich, dass auch das für die Reindampferzeugung verwendete Wasser, das Speisewasser, hohe Reinheitsanforderungen erfüllen muss, um zum einen ein perfektes Sterilisationsergebnis sicherzustellen und zum anderen Verunreinigungen oder Schäden an Sterilisiergut und Sterilisator zu verhindern.

Nicht kondensierbare Gase (NKG)

Entsprechend Abschnitt 2.3 lösen sich in Wasser, das in Kontakt mit der Umgebungsluft steht, die in der Luft enthaltenen Gase. Im Gegensatz zu Wasser, das bei den Bedingungen der Dampfsterilisation gasförmig als Dampf oder als kondensierter Dampf, also als flüssiges Wasser, vorliegen kann, ändern die Luftgase Stickstoff, Sauerstoff, Argon und Kohlendioxid ihren Aggregatzustand nicht. Sie bleiben gasförmig und werden daher als **Nicht Kondensierbare Gase (NKG)** bezeichnet.

Mit überhitztem Dampf mischen sich nicht kondensierbare Gase vollständig und gleichmäßig. In Satt-dampf sind sie jedoch ein „Fremdkörper“, der den Wärmeübergang und damit die Sättigung stört. Nicht kondensierbare Gase in Satt-dampf neigen dazu, Gasblasen zu bilden. Diese sogenannten Luftinseln sammeln sich bevorzugt an Stellen mit hohen

Wärmeverlusten und geringen Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb der Anlage, beispielsweise in nicht durchströmten Anlagenteilen oder in der Beladung.

Kann sich durch die Beladung hindurch keine Strömung einstellen, z.B. in einem Sterilisiergutcontainer mit geschlossenem Boden oder in einem nach allen Seiten offenen Textilpaket, verbleibt die Luftinsel über längere Zeit an einer Stelle und wirkt dort als Isolator. Dampf kann diesen Bereich der Beladung nicht mehr erreichen, wodurch dort die Dampfkondensation und die für die Sterilisationswirkung zwingend erforderliche Feuchtbildung verhindert werden. Darüber hinaus verhindert die Luftblase den ausreichenden Wärmeübergang vom Dampf auf das Sterilisiergut. Im Blaseninneren liegt die Temperatur daher deutlich unter der Sterilisationstemperatur in der restlichen Beladung, so dass eine erfolgreiche Sterilisation nicht sichergestellt ist [MEUR08].



Bild 5: Klörperboden eines Kesselkörpers mit Kesselstein und Korrosionsschäden

Beläge und Ablagerungen

Die im Speisewasser des Dampferzeugers enthaltenen Salze und Ionen können sowohl im Reindampferzeuger als auch im Sterilisator sowie auf der Beladung Rückstände und Ablagerungen hinterlassen. Im Kessel des Dampferzeugers konzentrieren sich die mit dem Speisewasser eingetragenen Wasserinhaltsstoffe sehr schnell auf. Da Salze und Ionen nur in sehr geringem Maß dampfgängig sind, weist der aus dem Dampferzeuger entnommene Reindampf eine deutlich geringere Konzentration an Verunreinigungen als das Speisewasser auf. Der Großteil der eingetragenen Wasserinhaltsstoffe verbleibt im Kesselwasser und konzentriert sich dort immer weiter auf, bis die Löslichkeit überschritten wird und Ablagerungen im Kessel auftreten. Kessel von Dampferzeugern müssen daher regelmäßig abgeschlämmt werden, wobei salzhaltiges Kesselwasser entnommen und durch salzarmes Speisewasser ersetzt wird.

Bekanntestes Beispiel für Ablagerungen im Kessel ist **Kesselstein**, eine Mischung aus Calcium- und Magnesiumcarbonat, der durch zu hartes Speisewasser oder eine zu hohe Aufkonzentration der Calcium- und Magnesium-Ionen im Kessel verursacht wird (vgl. Abschnitt 2.4). Kesselstein hat eine weißliche oder graue Färbung, bildet harte Schichten und haftet fest auf der Metalloberfläche.

Bild 5 zeigt den abgetrennten Klöpperboden eines Reindampferzeugers, der über längere Zeit nicht abgeschlämmt wurde und in dem sich die Restverunreinigungen aus dem Speisewasser sehr weit über das erlaubte Maß hinaus aufkonzentriert haben. Zur besseren Verdeutlichung der entstandenen Schäden wurde das Kesselinnere bereits einmal mit Zitronensäure gereinigt, um die Kesselstein-Schicht soweit abzutragen, dass die Edelstahloberfläche unter dem Kesselstein wieder sichtbar wird.

Trotz der Reinigung sind die Wasserlinie und in dem Bereich, der mit Wasser gefüllt war noch der weiße Schimmer aus Kesselstein-Rückständen zu erkennen. Bei den schwarz verfärbten Stellen handelt es sich um Korrosionsstellen, auf die im nächsten Abschnitt näher eingegangen wird. Das untere Teilbild zeigt die Reste des Kesselsteins in der Vergrößerung und massive Korrosion unter der Kesselstein-Schicht. Oberhalb der Wasserlinie, im Dampfraum, ist das Kesselmaterial noch in einem sehr guten Zustand. Es sind keine Ablagerungen und nur sehr wenige Schäden zu sehen.

Wird zu hartes Trink- oder Prozesswasser als Kühlmedium für den Sterilisator verwendet, kann es, ähnlich wie in einem Haushaltswasserkocher, bei Wassertemperaturen über 60°C auch im Kühl-



Bild 6: Verkalkung im Kühlwassersystem eines Sterilisators

wasserkreislauf des Sterilisators zu Carbonatausfällungen kommen. Man spricht in diesem Fall nicht von Kesselstein, sondern von **Verkalkung**.

Bild 6 zeigt das Laufrad einer Kühlwasser-Umlaufpumpe mit starker Verkalkung und durch die Kalkbildung verursachten Schäden an den Flügeln des Laufrads sowie eine Kühlwasserleitung, die durch Kalkbildung vollständig verschlossen wurde.

Auch in der Sterilisatorkammer und auf der Beladung kann es zu Belägen und Ablagerungen kommen, wenn die Verunreinigungen im Kesselwasser so hoch aufkonzentriert sind, dass sie mit dem Dampf mitgerissen werden und so in die Sterilisatorkammer gelangen.

Ein Beispiel aus der Praxis sind die oft bunt schillernden „Leopardenmuster“, die durch **Silikatrückstände** auf Edelstahloberflächen verursacht werden (siehe Bild 7). Silikate sind die Salze der Ortho-Kieselsäure H_4SiO_4 . Wenn die Salze zusammen mit dem Sterilisierdampf auf eine Edelstahloberfläche gelangen, kondensiert der Dampf zunächst auf der Oberfläche und das Silikat setzt sich als sehr fester Belag in dünnen Schichten auf der Oberfläche ab,



Bild 7: Silikatbeläge auf OP-Instrumenten

wenn das Kondensat in der Trocknungsphase später wieder verdampft.

Ob eine unzureichende Wasseraufbereitung oder fehlendes Abschlämmen des Dampferzeugers wirklich die Ursache für das Auftreten von Belägen in der Sterilisierkammer ist, muss jedoch immer im Detail analysiert werden. Silikatbeläge können beispielsweise auch durch Silikatrückstände verursacht sein, die nach einem maschinellen Waschprozess mit unzureichender Schlusspülung auf dem Sterilisiergut verblieben sind.

Korrosion

Heißes, vollentsalztes Wasser ist äußerst aggressiv. Um Korrosion und die Verunreinigung durch Korrosionsprodukte oder aus dem Werkstoff herausgelöste Komponenten zu vermeiden, müssen alle Bauteile eines Reindampferzeugers, des Reindampfversorgungssystems und des Sterilisators, die mit vollentsalztem Wasser, Reindampf und heißem Dampfkondensat in Berührung kommen, aus geeignetem Edelstahl oder geeigneten Kunststoffen gefertigt sein. Insbesondere Kupferwerkstoffe wie Rotguss oder Messing, Nickelwerkstoffe und unlegierte Stähle sind unbedingt zu vermeiden.

In der Dampfsterilisationstechnik werden daher fast ausschließlich rostfreie Edelstähle (hochlegierte Cr-Ni-Stähle) eingesetzt. Rostfreien Stählen sind neben Chrom und Nickel oft weitere Legierungsbestandteile wie Molybdän oder Titan zugegeben. Die Legierungsbestandteile bewirken, dass sich an der Luft eine dünne Schutzschicht (Passivschicht) aus Chrom- und Nickeloxid bildet, die glatt und dicht ist und dadurch den Grundwerkstoff Eisen vor Luftsauerstoff schützt und verhindert, dass der Stahl rostet. Wird die Schutzschicht verletzt, regeneriert sie sich selbst.

Trotzdem kann es auch bei rostfreien Stählen zu Korrosion kommen. Korrosion an Eisenwerkstoffen

wird meist als „Rost“ bezeichnet und beschreibt die Bildung von Eisenoxiden durch die Oxidation des Eisenwerkstoffes mit Sauerstoff unter Anwesenheit von Wasser. Eisenoxid ist eine weiche, poröse und wasserdurchlässige Substanz, es bildet sich durch die Korrosion keine geschlossene Schutzschicht, so dass die chemische Reaktion immer weiter fortschreitet und oft nicht mehr gestoppt werden kann.

Die Passivschicht eines rostfreien Edelstahls ist nur einige wenige Moleküldurchmesser stark und damit makroskopisch betrachtet sehr dünn. Dementsprechend wird sie bei der Verarbeitung eines Edelstahls (sägen, schleifen, fräsen, bohren, usw.) verletzt und regeneriert sich nach kurzer Zeit selbst. Aber auch im täglichen Betrieb kann die Passivschicht durch mechanische Einwirkungen (z.B. grobe Reinigungswerkzeuge) oder durch chemische Angriffe (z.B. aggressive Putzmittelbestandteile) wieder verletzt werden. Auch in diesen Fällen regeneriert sich die Passivschicht recht schnell wieder. In dem Zeitraum zwischen der Verletzung und der vollständigen Regeneration ist der Edelstahl jedoch gegen Korrosion anfällig.



*Bild 8: Korrosion an Edelstahl
(oben: durch Lochfraß vollständig zerstörtes Rohr;
unten: Dampfkesselblech mit deutlichem Lochfraß)*

Dieser Effekt ist auch aus der maschinellen Reinigungstechnik bekannt. Hier werden z.B. neue chirurgische Edelstahlinstrumente, bei denen der Zustand der Passivschicht nicht bekannt ist, vor der ersten Verwendung in einem Reinigungsgerät „eingewaschen“, damit sich die Passivschicht vor der ersten Verwendung voll ausbildet und die Instrumente gegen Korrosionsangriffe resistent werden.

Wichtige Erscheinungsformen der Korrosion bei CrNi-Stählen sind Lochfraß und Spannungsrisskorrosion.

Lochfraß wird vor allem durch Halogenide, also Chlor-, Iod- und Brom-Ionen begünstigt. Chlorid kommt meist als Natrium-Chlorid, also Kochsalz, vor. Kommt die Edelstahloberfläche mit chloridhaltigem Wasser in Berührung kann sich Chlorid in der Passivschicht festsetzen. Dabei verdrängt das Chlorid-Ion Sauerstoff aus der schützenden Passivschicht und verändert lokal deren Struktur. Diese Stelle bietet nun einen Angriffspunkt für Korrosion, die sich kanalförmig in den Werkstoff ausbreitet. Einmal begonnener Lochfraß kann nicht mehr gestoppt werden.

Spannungsrisskorrosion befällt einige Legierungen, darunter auch CrNi-Stahl. Unter dem gleichzeitigen Einfluss von Zugkräften und eines chemischen Angriffsmittels (z.B. Chlorid) entstehen feine Risse, die sich in sehr kurzer Zeit durch das Material fressen können. Typische Korrosionsprodukte (Rost) sind oft nicht zu sehen. Die typischen Rotfärbungen treten erst auf, wenn der Werkstoff völlig zerstört ist und die Korrosionsprodukte herausbrechen (siehe Bild 8).

Um korrosionsbedingte Schäden an Reindampferzeugern, Reindampf- und Kondensatleitungen sowie dem Sterilisator zu vermeiden, ist daher unbedingt darauf zu achten, dass das eingesetzte Speisewasser und der daraus erzeugte Sterilisierdampf frei von Halogeniden und insbesondere frei von Chlorid sind. Auch ist unbedingt darauf zu achten, dass die eingesetzten Reinigungsmittel halogenidfrei sind. So führt eine Reinigung der Sterilisierkammer mit salzsäurehaltigen Mitteln mit großer Wahrscheinlichkeit zu massiven Korrosionsschäden.

Insbesondere in Reinstdampf-Systemen tritt gelegentlich ein weiterer Korrosionseffekt auf, das sogenannte **Rouging**. Unter den sehr aggressiven und sauerstoffarmen Bedingungen eines hochreinen Dampfs kann es zu einer flächigen Schädigung der Passivschicht und der Bildung eines sehr dünnen und fest haftenden Belags aus Eisenoxid kommen. Der Effekt wird als rötliche oder graue Verfärbung der Edelstahloberfläche wahrgenommen. Der Belag haftet bei beginnendem Rouging jedoch so fest, dass

der Übergang von Metallionen in den Dampf in aller Regel nicht nachgewiesen werden kann, die Korrosionsprodukte also keinen Einfluss auf die Qualität der Reinstmedien haben.

Auch wenn der chemische Mechanismus des Rouging bekannt ist, kann Rouging in Reinstwasser- und Reinstdampfsystemen nie ganz vermieden werden. Design- und Konstruktion einer Anlage (z.B. elektropolierte Oberflächen, niedrige Temperaturen) können zwar die Auftretenswahrscheinlichkeit reduzieren, Rouging aber nicht sicher verhindern. Die Entfernung der Verfärbungen, das sogenannte De-Rouging, erfolgt in aufwendigen Verfahren mit speziellen Chemikalien. Danach muss die Edelstahloberfläche gezielt re-passiviert werden.

Oft treten in der Kammer von Dampfsterilisatoren rötliche Verfärbungen auf. In aller Regel handelt es sich hierbei nicht um Rouging, also nicht um einen Korrosionseffekt. Häufig sind diese Verfärbungen auf organische Rückstände aus dem Sterilisiergut (Verpackungen, Indikatoren, u.ä.) zurückzuführen, die leicht mit vollentsalztem Wasser oder einem geeigneten Kammerreinigungsmittel entfernt werden können.

In Sterilisatorkammern findet man gelegentlich einzelne rostrote Flecken. Hierbei kann es sich um **Flugrost** handeln. Unter Flugrost versteht man feine Eisen- oder Eisenoxidpartikel, die in die Kammer eingetragen werden und sich dort auf den Edelstahloberflächen niederschlagen. In Kontakt mit der Feuchtigkeit im Dampfsterilisator korrodiert das Eisen in den Partikeln und bildet die auffälligen rostroten Korrosionsprodukte. Durch den engen Kontakt mit der Oberfläche kann Flugrost „geschwächte“ Passivschichten angreifen, so dass die darunter liegende Stahloberfläche freigelegt wird und selbst korrodiert (rostet).

Die den Flugrost verursachenden Partikel können aus der Umgebungsluft stammen, wahrscheinlicher ist aber, dass sie über das Sterilisiergut eingetragen werden oder aus der zuführenden Dampfleitung stammen, wenn diese nicht aus geeigneten Materialien hergestellt wurde.

3. WASSERQUALITÄTEN IN DER DAMPF-STERILISATIONSTECHNIK

In der Dampfsterilisationstechnik kommen unterschiedliche Wasserqualitäten zum Einsatz, die in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden. Die hier zusammengestellten Informationen geben den generellen Stand der Technik wieder. Es ist jedoch immer zu berücksichtigen, dass im konkreten Anwendungsfall und insbesondere für die Auslegung einer Wasseraufbereitungsanlage immer erst sowohl die Qualitätsanforderungen des Geräteherstellers als auch die Nutzeranforderungen maßgeblich sind. Die üblicherweise für einen Dampfsterilisator vom Gerätehersteller bereitgestellte und mit dem Nutzer abgestimmte Installationszeichnung enthält daher die entsprechenden Informationen zur geforderten Betriebsmittelqualität.

In der Haustechnik und der Verfahrenstechnik werden die Begriffe Kaltwasser, Kältewasser und Kühlwasser nicht immer einheitlich verwendet. So bezeichnet der Begriff Kaltwasser in der Haustechnik nicht erwärmtes Brauchwasser oder Trinkwasser. In der Verfahrenstechnik meint man dagegen Wasser als Kälteüberträger, das im Gegensatz zu Kühlwasser direkt genutzt wird.

Um Missverständnissen vorzubeugen, werden daher in dieser Broschüre folgende Begriffe verwendet:

Brauchwasser: Wasser, das aus einem Leitungsnetz entnommen, für indirekte und direkte Kühlzwecke im Sterilisator verwendet und anschließend entsorgt wird.

Kältewasser: Kühlmittel, das in einem geschlossenen Kreislauf geführt wird und ausschließlich zur indirekten Kühlung dient. Das Kühlmittel wird nach der Verwendung nicht verworfen, sondern zur Rückkühlung an eine Kältemaschine zurückgegeben.

3.1 Anforderungen an Brauchwasser

Die meisten Dampfsterilisationsprozesse nutzen Brauch- oder Prozesswasser für Kühlzwecke, beispielsweise

- für die Kondensation des Sterilisierdampfes beim Austritt aus der Kammer,
- als Betriebswasser der Vakuumanlage,
- für die Kühlung von Abwasserströmen oder
- für die Dampfkondensation in Probenahmesystemen.

Hinsichtlich seiner mikrobiologischen und chemischen Eigenschaften soll dieses Kühlwasser Trinkwasserqualität haben. Um erhöhten Verschleiß an den Anlagenkomponenten sowie das Zusetzen enger Durchlässe zu vermeiden, muss das Wasser darüber hinaus frei von größeren Partikeln (üblicher-

weise frei von Partikeln $> 100 \mu\text{m}$) sein.

Die benötigte Brauchwassertemperatur ist von der Prozessführung abhängig. Zu warmes Kühlwasser erhöht den Wasserverbrauch, da das Kühlmedium weniger Wärme aufnehmen kann. Es kann jedoch auch dazu führen, dass der Prozess nicht mehr korrekt abläuft, beispielsweise wenn das Betriebswasser der Vakuumpumpe so warm ist, dass Vakuumschaltpunkte nicht erreicht werden. Zu kaltes Brauchwasser kann ebenfalls zu Fehlfunktionen führen, wenn dadurch lokale Vereisungen auftreten (z.B. in einem Gasstrahler) [DENN11].

Um das Kühlmedium optimal auszunutzen und den Verbrauch gering zu halten, muss die Anlage so ausgelegt werden, dass die Abwassertemperatur möglichst hoch ist. Lokal treten dabei Wassertemperaturen über 60°C auf. Um die Kalkbildung im Brauchwassersystem bei diesen Temperaturen gering zu halten, ist Wasser mit moderater Härte einzusetzen. Weichwasser (vgl. Abschnitt 3.2) ist in den meisten Anwendungsfällen nicht erforderlich. Es kann jedoch dazu verwendet werden, zu hartes Brauchwasser zu verschneiden, um so die Gesamthärte zu reduzieren.

Zusammenfassend sind für Brauchwasser folgende Mindestanforderungen einzuhalten:

- partikelfrei ($> 100 \mu\text{m}$)
- pH-Wert: 6,5 bis 8
- Härte: $< 10^\circ\text{dH}$
- Chlorid: $< 100 \text{ mg/l}$
- Temperatur: $8^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}$
- Fließdruck: 3 - 10 bar(ü)

Wird Brauchwasser aus dem Trinkwassernetz entnommen, ist DIN EN 1717 zu beachten [DIN 1717], die eine „Sicherungskombination“ aus Rohrbelüfter und Rückflussverhinderer fordert, um das Trinkwassernetz gegen Verschmutzung zu schützen. Die Verwendung von aufwendig hergestelltem Trinkwasser für Kühlzwecke ist jedoch möglichst zu vermeiden.

DIN 58946-7 beschreibt die Anforderungen an Betriebswasser für Vakuumpumpen für Dampfsterilisatoren im Gesundheitswesen [DIN 58946], DIN 58950-7 gibt eine Übersicht über die Qualitätsanforderungen an Wasser für Dampfsterilisatoren bei Sterilisatoren für pharmazeutische Sterilisiergüter [DIN 58950].

3.2 Weichwasser

Weichwasser ist Brauchwasser, dem die Härtebildner entzogen wurden, um in der gerätetechnischen Anwendung Verkalkung zu verhindern. Dazu wird das

Brauchwasser entweder in einer separaten Enthärtungsanlage behandelt oder im Fall einer mehrstufigen Wasseraufbereitungsanlage hinter der Enthärtungsstufe entnommen (siehe Kapitel 4). Das Wasser enthält zwar nur noch eine sehr geringe Konzentration an Härtebildnern, es ist jedoch nicht frei von Verunreinigungen und nicht ionenfrei.

Weichwasser kann im Dampfsterilisationsprozess dazu verwendet werden, zu hartes Brauchwasser zur Einstellung der Gesamthärte zu verschneiden.

Dementsprechend soll Weichwasser die gleichen Anforderungen wie Brauchwasser erfüllen, wobei jedoch die Gesamthärte nur bei 0 - 5°dH liegt.

3.3 Kältewasser

In vielen Anlagenkonfigurationen erfolgen die Dampfkondensation und die Kühlung der Vakuumpumpe nicht mit Hilfe von Brauchwasser, das nach der Verwendung verworfen wird, sondern über einen geschlossenen Kühlmittelkreislauf. Kühlmittelkreislauf und Prozessmedien des Sterilisators müssen dabei immer apparatetechnisch getrennt sein (meist über einen Wärmeaustauscher), um Verunreinigungen des Kühlmittels und Kühlmittelverlust im Kreislauf zu verhindern. Oft handelt es sich bei dem verwendeten Kühlmittel um Wasser, das durch Beimischung von Glykol gegen Einfrieren geschützt ist.

Da in einem Wärmeaustauscher immer eine Temperaturdifferenz zwischen Kühlmedium und gekühltem Prozessmedium bestehen bleibt, muss Kältewasser mit einer niedrigeren Temperatur zur Verfügung gestellt werden als Brauchwasser, damit es genauso effektiv arbeitet. Kältekreisläufe stellen Kältewasser oft mit 6 bis 8°C Vorlauftemperatur zur Verfügung, dass Betriebswasser der Vakuumpumpe kann dann leicht auf eine Betriebstemperatur von unter 15°C abgekühlt werden (vgl. Abschnitt 3.1).

Da Kältewasser zumeist zentral erzeugt und in einem geschlossenen Kreislauf zu verschiedenen Verbrauchern gepumpt wird, muss am Rücklauf noch ein so hoher Druck anliegen, dass das Kühlmedium zurück zur Kälteanlage gelangen kann. Üblicherweise liegt der Druck des Kühlmediums am Übergabepunkt zum Sterilisator bei 3 bar(ü), der Druckverlust über das Rohrleitungssystem und die Wärmetauscher des Sterilisators darf in der Regel 1 bar nicht überschreiten.

Darüber hinaus muss das Kühlmittel partikelfrei sein, darf gängige Werkstoffe nicht chemisch angreifen und keine Verkalkungen und Ablagerungen in Rohrleitungen und Apparaten verursachen.

Damit sind folgende Mindestanforderungen einzuhalten:

- partikelfrei
- nicht aggressiv
- Eingangsdruck: 3 - 10 bar(ü)
- Vorlauftemperatur: < 8°C

3.4 Kesselspeisewasser

Um das Sterilisiergut nicht zu verunreinigen, muss Sterilisierdampf hohen Reinheitsanforderungen entsprechen. Damit muss auch das Kesselspeisewasser, aus dem im Reindampferzeuger der Sterilisierdampf erzeugt wird, von entsprechender Qualität sein.

Außerdem ist zu berücksichtigen, dass sich die Konzentration der Verunreinigungen im Wasserraum eines Dampferzeugers stetig erhöht. Die mit dem Kesselspeisewasser eingetragenen NebenkompONENTEN gehen nicht in den Dampf über und reichern sich im Kesselwasser an. Auch wenn das Kesselwasser regelmäßig ausgetauscht wird, besteht die Gefahr, dass sich einige Ionen so hoch aufkonzentrieren, dass Kesselstein oder Korrosion auftreten [DENN11]. Die Konzentration kritischer Wasserinhaltsstoffe wie Halogenide, Härtebildner oder Silikate muss daher im Kesselspeisewasser immer besonders beobachtet werden.

EN 285 schlägt für Reindampferzeuger aus austenitischen Edelstählen, die Sterilisierdampf für medizinische Zwecke erzeugen, in Tabelle B.1 eine Kesselspeisewasserqualität vor, aus der sich für die Sterilisation von Medizinprodukten geeigneter Sterilisierdampf erzeugen lässt. Der Anhang B dieser Norm und die darin enthaltene Tabelle B.1 sind jedoch nur informativ. Die angegebenen Werte dürfen daher auch nur als Anhaltswerte, aber nicht als alleinige zu erfüllende Vorgabe aufgefasst werden. Kleine Ungenauigkeiten in EN 285 wie die Vorgabe einer Silikatkonzentration in mg/l ohne Angabe, ob hier das Gewicht des Siliziumanteils (Si) oder von SiO₂ gemeint ist, können daher zunächst vernachlässigt werden.

Aus langjähriger Erfahrung mit dem Betrieb von Reindampferzeugern für Sterilisierzwecke lassen sich Anforderungen an Kesselspeisewasser definieren, die zum einen eine sehr gute Dampfqualität sicherstellen und das Auftreten von Belägen und Korrosion im Kessel auf ein Minimum reduzieren und zum anderen durch moderne Wasseraufbereitungstechnik technisch leicht erreichbar sind. Es handelt sich um ein aus Trinkwasser hergestelltes, demineralisiertes (vollentsalztes) Wasser, das bei 25°C die folgenden Anforderungen erfüllt:

- Aussehen: klar, farblos, ohne Ablagerungen
- Abdampfdruckstand: < 2 mg/l
- pH-Wert: 5 bis 7,5
- Leitfähigkeit*: < 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Chlorid: < 0,2 mg/l
- Silikate (SiO_2): < 0,2 mg/l
- Phosphat: < 0,1 mg/l
- Fließdruck: 1 bis 10 bar(ü)

***Hinweis:** die Leitfähigkeit eines Wassers, das über Mischbettpatronen entionisiert wurde (vgl. Kapitel 4 und 5), ist deutlich geringer als 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$. In vielen Wasseraufbereitungsanlagen sind jedoch Leitfähigkeitssensoren verbaut, die Leitfähigkeiten unter 0,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ nicht detektieren können. Der hier angegebene Grenzwert ist daher so gewählt worden, dass man auch mit diesen Sensoren das Nullsignal von einem Messwert eindeutig unterscheiden kann.

Die oben zusammengefassten Angaben beschreiben die chemische Zusammensetzung des Kesselspeisewassers nicht vollständig. Durch die Vorgabe, Kesselspeisewasser für Dampfsterilisationsprozesse aus Rohwasser mit Trinkwasserqualität herzustellen und die in Kapitel 5 zusammengefassten Empfehlungen für geeignete Wasseraufbereitungstechnik sind zusätzliche Angaben jedoch nicht erforderlich.

Das so erzeugte Kesselspeisewasser ist für eine Vielzahl medizinischer, labortechnischer und industrieller Anwendungen geeignet. Branchenspezifische Anforderungen und spezielle Nutzeranforderungen sind jedoch immer gesondert zu berücksichtigen. DIN 58950-7 definiert beispielsweise pharmazeutischen Reindampf für Sterilisationsanwendungen, dessen Kondensat Wasser für Injektionszwecke nach dem Europäischen Arzneibuch entsprechen soll [DIN 58950]. Das zur Dampferzeugung eingesetzte Kesselspeisewasser muss dafür entsprechend geeignet sein.

3.5 Mantelkühlung

In Geräten zur Sterilisation von Flüssigkeiten darf der Prozess erst beendet und die Beladung entnommen werden, wenn die Flüssigkeitstemperatur deutlich unterhalb des Siedepunktes bei Umgebungsdruck liegt, um Unfälle durch spontan verdampfende überhitzte Flüssigkeiten zu verhindern. Der Kammermantel kann bei vielen Geräten während der Kühlphase mit kaltem Wasser geflutet werden, um die Abkühlung der Beladung in der Kammer zu beschleunigen.

Das als Kühlmittel verwendete Wasser kommt zwar nicht mit dem Sterilgut in Berührung, um jedoch zu

verhindern, dass innerhalb des Kammermantels Beläge, Verkalkungen oder Korrosion auftreten, muss das Wasser frei von Härtebildnern, Halogeniden (Chlorid) und anderen Belagbildnern sein.

In den meisten Fällen erfolgt die Mantelkühlung daher mit deionisiertem (vollentsalztem) Wasser, das Kesselspeisewasserqualität hat.

4. WASSERAUFBEREITUNGSTECHNIK

Kesselspeisewasser für die Sterilisierdampfherzeugung wird aus Brauch- oder Prozesswasser hergestellt, das nach Möglichkeit Trinkwasserqualität hat. Ein solches Rohwasser enthält Mineralien, Salze und diverse weitere Komponenten. Daher muss es – meist in mehreren Stufen – aufbereitet werden, bis man letztendlich deionisiertes, also vollentsalztes, Kesselspeisewasser erhält, das für Dampfsterilisationsprozesse geeignet ist.

Deionisiertes Wasser verhält sich gegenüber vielen Werkstoffen aggressiv und löst beispielsweise aus Kupfer und ungeeigneten Eisenwerkstoffen Legierungselemente heraus. Alle Bauteile einer Anlage, die mit vollentsalztem Kesselspeisewasser in Kontakt kommen, sind daher aus Edelstahl oder einem geeigneten Kunststoff herzustellen.

Um eine hohe und gleichbleibende Wasserqualität sicherstellen zu können, muss die Wasseraufbereitungsanlage zur Herstellung von vollentsalztem Kesselspeisewasser immer individuell ausgelegt und zusammengestellt werden. Wesentlichen Einfluss auf das Anlagendesign haben dabei:

- die Rohwasserherkunft und -qualität,
- die erforderlichen Produktwasserqualitäten (Weichwasser, Osmose-Permeat, vollentsalztes Wasser, Pharmawasser, usw.) sowie
- die Verbrauchsmengen und Abnahmeprofile.

Insbesondere die geforderte Wasserqualität bestimmt die für die Aufbereitung des Rohwassers erforderlichen Prozessstufen. Dieses Kapitel beschränkt sich dabei auf die Herstellung von vollentsalztem Wasser für die Dampfsterilisation. Wasseraufbereitungsverfahren zur Herstellung von Reinstwasser

(Ultrapure Water) oder Pharmawasser werden hier nicht betrachtet, auch wenn viele Prozessschritte in beiden Anwendungen vergleichbar sind.

Deionisiertes Wasser lässt sich mit vergleichbarer Qualität sowohl über die Destillation von Rohwasser und anschließende Kondensation des Dampfes als auch über Membran- und Ionenaustauschverfahren herstellen. Destillationsverfahren sind jedoch deutlich energieintensiver und spielen daher in der Dampfsterilisationstechnik kaum eine Rolle.

Das in einem Destillationsprozess erzeugte Wasser wird als **destilliertes Wasser** bezeichnet. Die Bezeichnung für Wasser aus Ionenaustauscher- und Membrananlagen lautet **demineralisiertes Wasser** (Demi-Wasser), **deionisiertes Wasser** oder **vollentsalztes (VE-)Wasser**.

Abhängig vom Gehalt der Restverunreinigungen kann zwischen **Reinwasser** bzw. Purified Water (Leitfähigkeit 1 - 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$), VE-Wasser (Leitfähigkeit 0,1 - 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$) und **Reinstwasser** bzw. Ultrapure Water (Leitfähigkeit < 0,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$) unterschieden werden.

Diese Bezeichnungen sind jedoch keine allgemeingültigen und überall gleich verstandenen Qualitätsbeschreibungen. Oft definieren individuelle betriebsinterne Vorgaben, welche chemischen und physikalischen Parameter einzuhalten sind.

Außer bei Anlagen für sehr kleine Produktvolumenströme, die oft nur aus einer einzelnen Entionierungsstufe bestehen, handelt es sich bei einer Wasseraufbereitungsanlage zur Herstellung von VE-Wasser um einen mehrstufigen Prozess.

Auch wenn das Rohwasser Trinkwasserqualität aufweist, muss sichergestellt sein, dass keine organi-

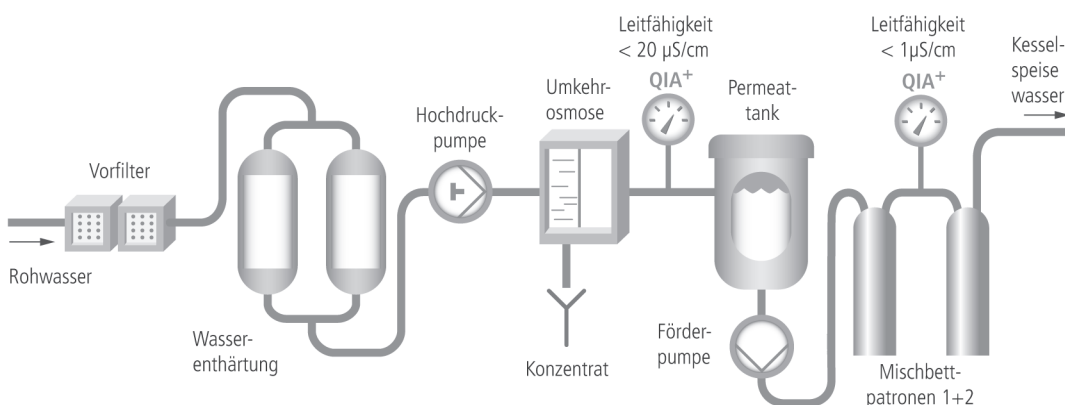


Bild 9: Prinzip der Kesselspeisewasseraufbereitung

schen und anorganischen Inhaltsstoffe sowie Partikel aus dem Leitungsnetz in die Aufbereitungsanlage gelangen und dort zu Verblockungen oder Schäden an den Anlagenkomponenten führen. Die Anlagen sind daher in einer ersten Stufe mit einer **Vorreinigung** (meist ein mechanischer Vorfilter oder ein- bzw. mehrstufige Carbonfilter) ausgestattet.

Das Rohwasser wird danach einer **Enthärtungsstufe** zugeführt. Die Enthärtungsanlage bindet Härtebildner wie Magnesium- und Calciumionen, um die nachfolgenden Anlagenteile gegen Verblockung durch Kalkbildung zu schützen. Bei weichem Rohwasser kann auf die Enthärtung verzichtet werden. Abschließend erfolgt die **Entionisierung** des Weichwassers in mehreren Stufen, d.h. Salze, Mineralien und Ionen werden aus dem Wasser nahezu vollständig entfernt.

Zusätzliche Ultrafiltrationsstufen (Abtrennung von Teilchen $< 0,1 \mu\text{m}$, z.B. Bakterien) oder eine UV-Desinfektionseinheit können das oben beschriebene Grundkonzept ergänzen.

Bild 9 zeigt eine typische Wasseraufbereitungsanlage zur Herstellung von vollentsalztem Kesselspeisewasser für Laboranwendungen, nach EN 285 im medizinischen Bereich oder für industrielle Sterilisationsprozesse, beispielsweise in der Lebensmittelindustrie.

4.1 Enthärtung

Als Wasserhärte bezeichnet man die Konzentration an Calcium- und Magnesium-Kationen im Wasser (vgl. Abschnitt 2.4). Bei höheren Temperaturen und

Drücken fallen schwer lösliche Calcium- und Magnesiumcarbonate aus und können zur Bildung von unerwünschten Kalkablagerungen führen. Als Enthärtung bezeichnet man eine Prozessstufe, die gezielt die Härtebildner Calcium und Magnesium aus dem Wasser entfernt.

Die Enthärtung mittels Ionenaustauscherverfahren ist das am weitesten verbreitete Verfahren. Das Wasser durchströmt dabei ein Harz, dessen Oberfläche dicht mit Natrium-Ionen besetzt ist. Die Calcium- und Magnesium-Ionen im Wasser verdrängen das Natrium von den aktiven Bindungsstellen des Harzes, wodurch sich Natrium-Ionen im Wasser lösen und sich gleichzeitig Calcium- und Magnesium-Ionen an der Harzoberfläche anlagern. Da die Natriumsalze viel besser löslich sind, bilden sich bei Temperatur- und Druckerhöhungen keine Ablagerungen mehr. Das Risiko des Kalkausfalls ist eliminiert.

Bei der Enthärtung mittels Ionenaustausch werden die Ionen-Aktivität und die Leitfähigkeit des Wassers nicht verändert. Ein zweifach positiv geladenes Calcium- bzw. Magnesium-Ion wird gegen zwei einfach positiv geladene Natrium-Ionen ausgetauscht. Es erfolgt also lediglich ein Austausch der Härtebildner gegen unkritische Ionen bzw. schwer löslicher Salze gegen gut lösliche Salze.

Die Kapazität des zur Enthärtung eingesetzten Ionenaustauscherharzes ist begrenzt. Sobald alle Natrium-Ionen auf der Harzoberfläche in Lösung gegangen sind, muss das Harz regeneriert werden, d.h. Calcium- und Magnesium müssen von der Harzoberfläche entfernt und diese erneut mit Natrium-Ionen angereichert werden. Je nach Anlagenkapazität und Hersteller werden verschiedene Bauarten angeboten. Die Regeneration erfolgt im einfachsten Fall offline, wobei die erschöpfte Enthärtungspatrone gegen eine frische ersetzt und dann beim Hersteller regeneriert wird. Verschaltet man mehrere Enthärtungspatronen parallel (Doppelenthärtungsanlage), kann die Regeneration im laufenden Betrieb erfolgen. Über eine der Patronen wird das Wasser enthärtet während die zweite Patrone gleichzeitig mit einer hochkonzentrierten Kochsalzlösung regeneriert wird. Ist die erste Patrone erschöpft, schaltet die Anlage automatisch auf die zweite Patrone um und beginnt die Regeneration der ersten Ionenaustauscherpatrone.

4.2 Umkehrosmose

Die **Umkehrosmose-Anlage** ist ein Teilentsalzungsverfahren, das einen Großteil der im Wasser enthaltenen Salze, Mineralien, Metalle und Mikroorganismen entfernt. Die Leitfähigkeit des gereinigten

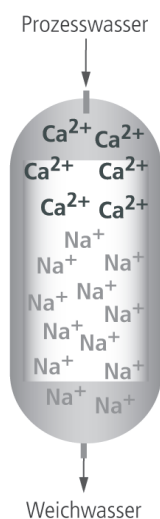


Bild 10: Prinzip der Wasserenthärtung

Wassers, des Osmose-Permeats, beträgt üblicherweise weniger als $20 \mu\text{S}/\text{cm}$. Die Wasserinhaltsstoffe verlassen die Umkehrosmose mit dem Konzentrat (vgl. Bild 11). Die Rückhalterate einer modernen Umkehrosmoseanlage liegt bei etwa 98%. Die Ausbeute an Osmose-Permeat ist von der Qualität der eingesetzten Membran und der eingestellten Restleitfähigkeit des Permeats, desto niedriger die Ausbeute, sollte aber immer Werte von mehr als 50% erreichen.

Trennt man zwei Gefäße mit wässrigen Lösungen unterschiedlicher Salzkonzentrationen durch eine halbdurchlässige (semipermeable) Membran, die aufgrund ihrer geringen Porengröße die Diffusion der kleinen Wassermoleküle, aber nicht den Durchtritt der meist größeren Wasserinhaltsstoffe zulässt, wandert das Wasser von der Seite geringer Salzkonzentration in Richtung der hohen Konzentration. Das System hat die Tendenz, die Lösung hoher Konzentration zu verdünnen, wodurch der Wasserspiegel auf der höher konzentrierten Seite ansteigt. Dieser Vorgang wird als Osmose bezeichnet.

Mit steigendem Wasserspiegel steigt auch der statische Druck im Gefäß mit der höher konzentrierten Salzlösung. Der Prozess läuft solange weiter, bis das Bestreben der Wassermoleküle, durch die Membran zu treten, den statischen Gegendruck nicht mehr überwinden kann. Dieser Druck heißt osmotischer Druck.

In einer Umkehrosmose-Anlage wird dieses Verhalten umgekehrt. Das Rohwasser, in diesem Fall das Konzentrat, wird unter einen so hohen Druck ge-

setzt, dass der Wasserdruck auf der Konzentratseite höher als die osmotische Druckdifferenz zwischen Konzentrat und der reinen Seite ist. Dementsprechend bewegen sich jetzt Wassermoleküle durch die Membran in Richtung des niedriger konzentrierten Permeats. Das Konzentrat wird dabei weiter eingedickt. Pumpt man mit einer Hochdruckpumpe kontinuierlich neues Rohwasser in die Umkehrosmosezelle und führt einen Teil des Konzentrats ab, kann sich kein Gleichgewicht einstellen und der Prozess produziert fortlaufend gereinigtes Wasser.

Die Umkehrosmose ist ein rein physikalisches Verfahren. Eine chemische Regeneration der Membranen ist in aller Regel nicht erforderlich, wodurch zusätzliche Belastungen der Umwelt entfallen. In regelmäßigen Abständen ist jedoch ein kurzes Rückspülen erforderlich, durch das Verunreinigungen, Ablagerungen und Mikroorganismen aus den Membranen herausgeschwemmt werden.

Moleküle und Ionen, deren Größe vergleichbar zu der eines Wassermoleküls ist, können in geringem Maß ebenfalls durch die Membran gelangen. Die Rückhalterate ist dabei für die verschiedenen Salze unterschiedlich gut. Gase und speziell Kohlendioxid werden gar nicht zurückgehalten, wodurch das Permeat meist sauer und unangenehm aggressiv wird.

4.3 Vollentsalzung

Um die für einen Dampfsterilisationsprozess erforderliche Kesselspeisewasser- und Reindampfqualität erreichen zu können, ist eine weitere Aufreinigung des Osmose-Permeats erforderlich.

Für diese Feinreinigung eignen sich **Mischbettpatronen** besonders. Gefüllt mit einer Mischung aus Anionen- und Kationenaustauscherharzen sind solche Ionenaustausch-Patronen in der Lage, die nach der Umkehrosmose noch im Wasser enthaltenen Salze, Säuren und Basen abzuscheiden und ein Reinstwasser zu erzeugen, das eine Leitfähigkeit von weniger als $0,1 \mu\text{S}/\text{cm}$ aufweist.

Die Oberfläche des Harzes ist sowohl mit positiv geladenen Wasserstoff-Ionen (H^+) als auch mit negativ geladenen Hydroxid-Ionen (OH^-) belegt. Durchströmt Wasser dieses Harz, verdrängen die positiv geladenen Wasserinhaltsstoffe wie das Natrium-Ion (Na^+) Wasserstoff-Ionen von den aktiven Bindungsstellen des Harzes. Genauso verdrängen negativ geladene Wasserbestandteile wie Chlorid (Cl^-) Hydroxid-Ionen von deren Bindungsstellen. Die frei gewordenen Wasserstoff- und Hydroxid-Ionen bilden Wasser, die positiv und negativ geladenen Wasserinhaltsstoffe verbleiben auf der Harzoberfläche.

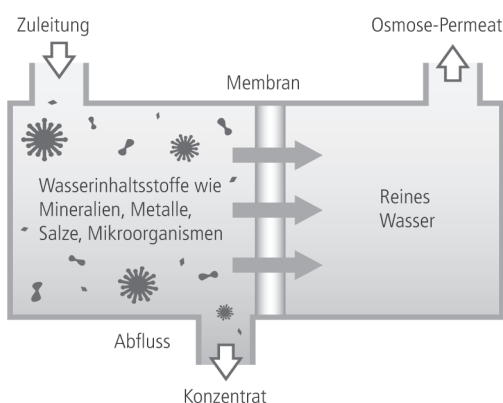


Bild 11: Umkehrosmosezelle mit semipermeabler Membran

Die Wasserinhaltsstoffe werden dabei in folgender Reihenfolge unterschiedlich stark festgehalten:

- Sulfate und Carbonate
- Chlorid
- Kohlensäure
- Kieselsäure (Silikate)

Schwach gebundene Stoffe wie Silikate werden von stärker gebundenen Komponenten immer wieder aus den Harzen verdrängt und etwas weiter in Richtung Ausgang der Patrone verschoben. In der Patrone bilden sich damit Schichten der verschiedenen Wasserinhaltsstoffe. Ist die Kapazität der Patrone erschöpft und wird diese überfahren, gelangt eine regelrechte „Wolke“ derjenigen Komponente, die am nächsten am Ausgang liegt, in das Reinstwasser. Als

erstes bricht Kieselsäure durch, die Leitfähigkeit des Reinstwassers als offensichtlichstes Qualitätskriterium erhöht sich dadurch jedoch kaum, da Kieselsäure im neutralen und leicht sauren Bereich nur in sehr geringem Umfang dissoziiert und dementsprechend keine freien Ladungsträger (Ionen) für den Transport von elektrischem Strom bereitstellt. Wenn danach Kohlendioxid durchbricht, steigt die Leitfähigkeit leicht an, aber erst wenn Chlorid in das Reinstwasser gelangt, wird eine so hohe Leitfähigkeit erreicht, dass die in Wasseraufbereitungsanlagen üblicherweise eingesetzten Leitfähigkeits-Messgeräte ansprechen.

Es ist daher naheliegend, eine Vollentsalzung aus zwei in Reihe angeordneten Mischbettpatronen aufzubauen (vgl. Bild 12), wobei Patrone 2 als Absicherung hinter das Leitwertmessgerät geschaltet ist, um unbemerkt durchbrechendes Silikat aus Patrone 1 aufzufangen („Silikatschlupf“). Sobald der Leitwert am Ausgang der ersten Patrone anfängt zu steigen (max. $5 \mu\text{S}/\text{cm}$) gibt man Patrone 1 zur Regeneration. Patrone 2, die zur Absicherung verwendet wurde, wird dann an deren Platz gesetzt und eine vorhandene, frisch regenerierte Patrone 3 als neue Sicherung verwendet. Einmal jährlich sollten jedoch alle Patronen zusammen regeneriert werden, um das in der jeweils zweiten Patrone gesammelte Silikat aus dem System zu entfernen. Die Regeneration der Harze führen entsprechend spezialisierte Betriebe durch, den Austausch der Patronen kann der Betreiber selbst vornehmen.

Hinweise zur Leitwertmessung: Da sich die Wasserinhaltsstoffe als Schichten durch das Harzbett bewegen, erfolgt der Durchbruch der ersten Komponenten sehr plötzlich. Das Leitfähigkeitsmessgerät, das am Austritt der ersten Patrone installiert ist, zeigt daher über die gesamte Betriebszeit durchgehend einen sehr niedrigen Leitwert an. Der Anstieg des Leitwerts bei einer erschöpften Patrone auf unzulässig hohe Werte erfolgt dann jedoch extrem schnell, so dass eine tägliche Kontrolle des Leitwerts oft nicht ausreicht und kürzere Intervalle gewählt werden müssen.

Wenn über längere Zeit kein Wasser durch die Mischbettpatronen fließt, beispielsweise über Nacht, steigt die Leitwertanzeige in einigen Messgeräten an. Dies gaukelt dem Anwender ggf. eine erschöpfte Patrone vor. Finden Sie also nach einem Anlagenstillstand einen erhöhten Leitwert vor, starten Sie die Anlage trotzdem und beobachten das Leitwertmessgerät. Sinkt der Leitwert innerhalb einiger Minuten Durchströmung wieder ab, kann die Patrone weiter verwendet werden.

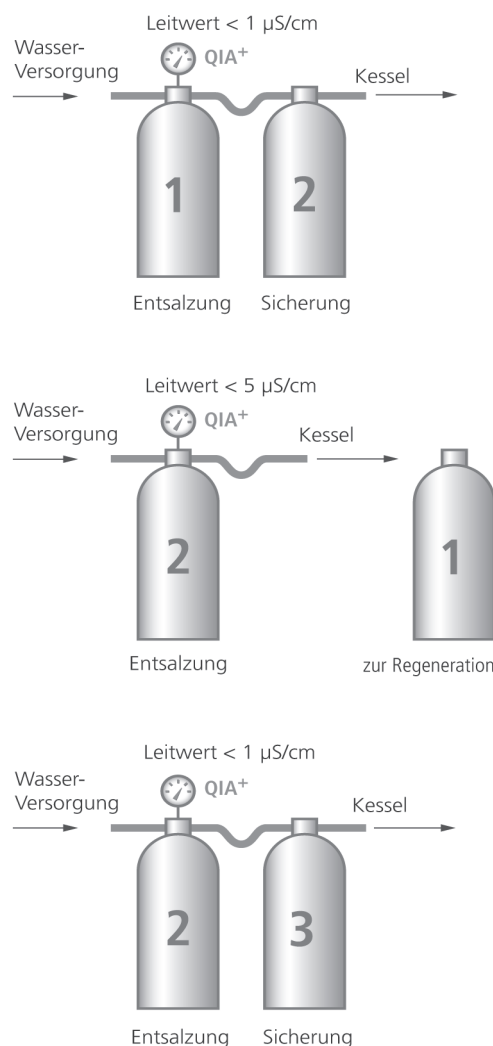


Bild 12: Schutz vor Silikat

Hinter den Mischbettpatronen wird ein weiterer Feinfilter benötigt. Die wiederverwendbaren Harze können selbst Partikel abgeben oder z.B. Rostpartikel und organische Stoffe enthalten, die bei der chemischen Aufbereitung nicht entfernt wurden. Der Filter schützt die nachfolgenden Anlagenteile vor Verschmutzungen.

Mischbettpatronen erzeugen auch ohne vorgeschaltete Umkehrosmose ausreichend reines Speisewasser für die Erzeugung von Sterilisierdampf. Aufgrund des höheren Salz- und Mineralgehalts des Rohwassers reduzieren sich die Standzeiten jedoch deutlich. Durch die damit verbundenen hohen Regenerationskosten ist diese Lösung nur für Anlagen mit geringer Kapazität wirtschaftlich.

Ein weiteres Verfahren zur Vollentsalzung ist die **Elektroentionisierung** oder **EDI (Elektrodeionisierung)**, die effektiv zur Feinreinigung von Umkehrosmose-Permeat eingesetzt werden kann. Dabei fließt das Osmose-Permeat durch mehrere parallel angeordnete Kammern, die ebenfalls mit einem Mischbett aus Kationen- und Anionenaustauscherharzen gefüllt sind. Zwischen diesen Kammern befinden sich Konzentratsammelräume. Die Abtrennung erfolgt abwechselnd durch selektive Membranen, die entweder nur für Anionen (negativ geladene Teilchen) oder nur für Kationen (positiv geladene Teilchen) durchlässig sind. Durch Anlegen einer schwachen elektrischen Spannung werden die auf den Mischbettharzen festgehaltenen Wasserinhaltsstoffe entsprechend ihrer elektrischen Ladung in verschiedenen Richtungen durch die jeweilige Membran „abgesaugt“ und das Osmose-Permeat so aufgereinigt. Das Produkt wird als Diluat bezeichnet. Gleichzeitig bewirkt die elektrische Spannung eine teilweise Selbstdissoziation von Wasser in H^+ und OH^- . Die Ionen lagern sich an den freigewordenen Bindestellen des Harzes an, wodurch sich die Harze kontinuierlich selbst regenerieren, ohne dass zusätzliche Chemikalien eingesetzt werden müssten.

Eine solche Anlage liefert eine konstante Wasserqualität, das oft diskutierte, schwallweise Auftreten von Verunreinigungen oder ein Überfahren der Anlage kommt bei korrekter Dimensionierung nicht vor. Die Restverunreinigungen einiger Wasserinhaltsstoffe im Diluat einer Elektrodeionisationsstufe sind jedoch oft höher als nach Mischbettpatronen. Für kritische Anwendungen, beispielsweise für die Aufbereitung von Medizinprodukten, empfiehlt es sich daher, nach der Elektrodeionisation doch wieder ein Mischbett aus zwei in Reihe geschalteten Patronen als Polisher

einzusetzen [DGSV22].

Da auf den Einsatz von Mischbettpatronen damit nicht verzichtet werden kann, entfällt aus Gründen der Wirtschaftlichkeit oft die Elektrodeionisationsstufe. Zur Vollentsalzung kommen dann nur Mischbettpatronen zum Einsatz.

4.4 Lagerung

Die Dampfsterilisation ist ein diskontinuierlicher Prozess, bei dem der Sterilisierdampf und damit auch das Kesselspeisewasser immer nur für kurze Zeitabschnitte, also „stoßweise“ bereitgestellt werden müssen. Eine Wasseraufbereitungsanlage kann die hierfür erforderlichen und über kurze Zeiträume sehr hohen Abnahmemengen nicht direkt zur Verfügung stellen. Ein Lagertank wird daher als Pufferbehälter eingesetzt, der das kontinuierlich produzierte Wasser aus der Wasseraufbereitungsanlage speichert und über eine ausreichend dimensionierte Förderpumpe die kurzzeitige Abnahme großer Wassermengen erlaubt.

Um Verunreinigungen und Verkeimungen aus der Umgebungsluft zu verhindern, ist der Tank in geschlossener Bauweise und aus lichtundurchlässigem Material auszuführen. Die Belüftung soll über einen Sterilfilter erfolgen.

Die Größe des Lagertanks ist so auszulegen, dass die gespeicherte Wassermenge ausreicht, um die kurzzeitige Spitzenabnahme aller angeschlossenen Verbraucher gleichzeitig abzudecken. Darüber hinaus sollte der Tank so groß dimensioniert sein, dass auch bei einem Ausfall der Wasseraufbereitungsanlage der Betrieb der Sterilisatoren für einen angemessenen Zeitraum aufrecht erhalten werden kann. Zu große Lagertanks sind jedoch zu vermeiden, um das Risiko von Verkeimung und Verunreinigungen zu verringern. Als guter Anhaltswert soll die Tankgröße daher etwa den Wasserverbrauch einer Schicht abdecken.

Um die Verunreinigung des Tanks zu verhindern, wird oft vorgeschlagen, den Tank nach den Mischbettpatronen anzuordnen, also zur Speicherung von Reinstwasser zu verwenden. Umgekehrt lässt sich aber auch argumentieren, Osmosepermeat zu speichern und dieses mit Hilfe der Förderpumpe über Mischbettpatronen und dann direkt zum Verbraucher zu führen. Diese zweite Anordnung birgt den Vorteil, dass Restverunreinigungen im Tank keine Auswirkung auf die Kesselspeisewasserqualität haben.

Ideal ist eine Kombination aus beiden Anordnungen. Das Umkehrosmose-Permeat wird in einem weiteren Entionisierungsschritt vollentsalzt und das VE-Wasser dann gespeichert. Zusätzlich werden jedoch

weitere Mischbettpatronen direkt am Zulauf der Dampferzeuger positioniert. Damit filtert man eventuelle Restverunreinigungen aus dem Tank und ggf. vorhandene Verunreinigungen aus dem Verteilnetz aus dem Kesselspeisewasser heraus.

4.5 Entgasung

Die in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Aufbereitungsschritte entfernen Partikel sowie positiv und negativ geladenen Teilchen aus dem Wasser. Gelöste Gase und insbesondere Kohlendioxid sind jedoch weiterhin im vollentsalzten Wasser enthalten. Insbesondere bei längeren Verweilzeiten in einem Lagertank kann sich das aufbereitete Wasser mit Luftgasen anreichern.

Da nicht kondensierbare Gase im Sterilisierdampf das Sterilisationsergebnis beeinträchtigen, sind Sterilisierdampferzeuger meist mit Einrichtungen zur Speisewasserentgasung ausgestattet. Das Wasser wird dazu in einem separaten Speisewassergefäß auf eine Temperatur über 90°C erhitzt, um die gelösten Gase auszutreiben und erst danach in den Dampferzeuger gepumpt.

Zentrale Entgasungsanlagen wie sie beispielsweise aus der Fernwärmetechnik bekannt sind oder alternative Entgasungsverfahren im Vakuum oder mit Membrantechnik finden in der Sterilisationstechnik bislang kaum Anwendung.

Hinweis: EN 285 enthält die Vorgabe, dass der Sterilisierdampf eine maximale Konzentration an nichtkondensierbaren Gasen von 35 ml Gas pro Liter Dampfkondensat enthalten darf. Hierbei ist zu beachten, dass es sich bei dieser Norm um eine Produktnorm für medizinische Dampfsterilisatoren handelt. Daraus folgt, dass jeder Dampfsterilisator, der diese Norm erfüllt, mit Sterilisierdampf betrieben werden können muss, der weniger als 35 ml/l nichtkondensierbare Gase enthält.

Der weit verbreitete Umkehrschluss, dass Sterilisierdampf nicht mehr als 3,5% Gase enthalten darf, ist jedoch nicht korrekt. Enthält der Dampf mehr als 35 ml/l Gase und arbeitet der Sterilisator auch mit einem erhöhten Gasanteil normgerecht und liefert gute Sterilisierungsergebnisse, erfüllen die Dampferzeugung und der Sterilisator trotzdem die normativen Anforderungen.

5. EMPFEHLUNGEN FÜR DIE VE-WASSER-HERSTELLUNG UND DAS ABSCHLÄMMEN VON REINDAMPFERZEUGERN

Die Restverunreinigungen im Kesselspeisewasser haben für die Dampfqualität und damit für den Sterilisationsprozess eine besondere Bedeutung. Die Wasserqualität wird wesentlich durch den Aufbau der Wasseraufbereitungsanlage bestimmt. Durch die Wasseraufbereitung sollen die im Wasser vorhandenen nicht kondensierbaren Gase und gelöste Mineralsalze möglichst vollständig entfernt werden. Grundsätzlich wird empfohlen, zunächst beim örtlichen Wasserversorger eine aktuelle Trinkwasseranalyse einzuholen. Diese gibt Aufschluss über Art und Menge der vorhandenen Ionen und den erforderlichen Aufbau einer optimal konfigurierten Wasseraufbereitungsanlage.

Als Mindestanforderung an eine Wasseraufbereitung zur Speisewassererzeugung für Sterilisationsanwendungen in der Medizin, im Labor und in vielen Industrieanwendungen sind eine zweistufige Entionisierungseinrichtung (z.B. Umkehrosmose mit zwei nachgeschalteten Mischbettaustauscherpatronen) und eine Leitfähigkeitsmessung vor der zweiten Austauscherpatrone anzusehen, um die positiv und negativ geladenen Ionen möglichst vollständig aus dem Speisewasser abzutrennen.

Die Umkehrosmoseanlage ist in der Lage, bis zu 98% der gelösten Salze aus dem Rohwasser zu entfernen. Die Leitfähigkeit des Wassers als Summenkriterium für den Salzgehalt liegt nach der Umkehrosmoseanlage üblicherweise unter 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Restsalze, und dabei insbesondere Silikate und Chlorid, können jedoch auch noch in geringen Konzentrationen Beläge und Korrosion an hochlegierten Edelstählen verursachen. Zum Schutz der Instrumente, des Dampferzeugers und des Sterilisators ist es daher erforderlich, die verbliebenen Salze in einer nachgeschalteten Mischbettpatrone abzutrennen und wiederum als Summenkriterium die Leitfähigkeit am Ausgang dieser Mischbettpatrone zu überwachen. Es wird dringend empfohlen, dauerhaft eine Leitfähigkeit unter 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ einzuhalten. Eine kontinuierliche Überwachung ist anzuraten, mindestens ist jedoch eine tägliche Bestimmung und Dokumentation der Leitfähigkeit hinter der ersten Mischbettpatrone vorzusehen. Ist diese Mischbettpatrone erschöpft, brechen zuerst Silikate und später Chlorid durch. Hierbei wird kein nennenswerter Anstieg der Leitfähigkeit gemessen („Silikatschlupf“). Um Beläge und Korrosion verlässlich zu verhindern, fängt die zweite Mischbettpatrone die durchgebrochenen Ionen ab. Sobald dann jedoch ein erster Anstieg der Leitfähigkeit messbar ist, muss die erschöpfte Mischbettpatrone sofort aus-

getauscht werden. Als Grenzwert für einen solchen Peak sind 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ anzusehen. Bei jedem Wechsel der Mischbettpatrone ist darüber hinaus das Kesselwasser komplett auszutauschen.

Auch bei optimaler Speisewasseraufbereitung erreichen immer noch geringste Salzmenngen den Reindampferzeuger. Die Salze konzentrieren sich mit der Zeit im Kessel des Reindampferzeugers auf. Als Summenkriterium für eine akzeptable Salzkonzentration im Kesselwasser kann wiederum die Leitfähigkeit herangezogen werden. Zum Schutz von Instrumenten und Kessel darf die Gesamtleitfähigkeit des Kesselwassers 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bei 25°C nicht überschreiten. Der Kessel eines Reindampferzeugers ist jedes Mal vollständig zu entleeren (abzuschlämmen) und wieder mit frischem VE-Wasser aufzufüllen, wenn dieser Grenzwert erreicht wurde.

Der Zeitraum, in dem der Grenzwert von 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ erreicht wird, hängt vor allem von

- der Speisewasserqualität,
- dem Kesselvolumen,
- der Betriebsweise des Dampferzeugers und
- der aus dem Dampferzeuger entnommenen Dampfmenge

ab. Bei kleinen Dampferzeugern und hoher Dampfentnahme steigt die Leitfähigkeit im Kessel deutlich schneller als bei großvolumigen Kesseln mit geringer Nutzung.

Ist eine automatische Absalzung installiert, die regelmäßig eine bestimmte Kesselwassermenge aus dem Kessel abführt, wird der Zeitraum bis zum Erreichen des Grenzwertes deutlich verlängert. Üblicherweise ist jedoch trotzdem ein regelmäßiges manuelles Abschlämmen des Kessels erforderlich, um eine Überschreitung der zulässigen Salzkonzentration zu vermeiden.

Aufgrund der Vielzahl der Einflussfaktoren, sollten nach der Inbetriebnahme der Dampferzeuger und der Sterilisatoren nach einem ersten Austausch des Kesselwassers tägliche Kontrollmessungen der Leitfähigkeit im Kesselwasser durchgeführt werden, um den ungefähren Zeitraum bis zum Erreichen des Leitfähigkeitsgrenzwertes zu ermitteln. Übliche Zeiträume für ein Abschlämmen der Kessel liegen bei 1 - 4 Wochen. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass ein Mehrschichtbetrieb oder die bevorzugte Entnahme von Dampf aus einem Kessel einer Mehrkesselversorgung auch zu kürzeren Zeiträumen führen können.

6. EMPFEHLUNGEN FÜR DIE PROBENAHME

Vollentsalztes Wasser, das als Kesselspeisewasser in der Dampfsterilisation eingesetzt wird, hat nur noch sehr geringe Restverunreinigungen im ppm-Bereich (**p**arts **p**er **m**illion). 1 ppm bedeutet, dass der Gewichtsanteil der Verunreinigung nur ein Millionstel des Gewichts des Lösungsmittels Wassers beträgt. Bei der Entnahme von Wasserproben zur Überprüfung der Speisewasserqualität, der Qualität des Reindampfkondensats oder des Kesselwassers ist es daher unumgänglich, sehr präzise und sauber zu arbeiten, um die Probe nicht zu verunreinigen und dadurch falsche Messergebnisse zu erhalten. Schon kleinste Restmengen an Spülwasser in einem Probenahmegefäß, minimale Verschmutzungen in der Entnahmeleitung bzw. in der Probenahmeverrichtung oder die unsachgemäße Lagerung einer Wasserprobe können das Messergebnis massiv verfälschen. Die nachfolgenden Hinweise für eine gute Probenahmepraxis können helfen, die Verlässlichkeit der Ergebnisse einer Wasseranalyse zu verbessern.

Verwenden Sie nur absolut saubere und idealerweise neue und originalverpackte **Probenahmegefäße**. Das Gefäß muss aus einem Material bestehen, das beständig gegen hochreines Wasser ist und keine Komponenten an das Wasser abgibt. Polyethylen (PE)- oder Glasflaschen sind besonders geeignet. Spülen Sie das Probenahmegefäß vor der Benutzung nicht mit Trinkwasser. Schon kleinste Resttröpfchen machen das Messergebnis unbrauchbar.

Lassen Sie vor der eigentlichen **Probenahme** eine ausreichende Menge Wasser abströmen, um die Probenahmeeinrichtung zu spülen. Füllen Sie erst dann das Probenahmegefäß und werfen auch diese erste Füllung. Danach ziehen Sie eine Wasserprobe in das so gespülte Gefäß.

Entnimmt man Wasserproben aus dem Dampfkessel oder Kondensatproben aus Sterilisator oder Dampfleitung, sind diese sehr heiß und damit nur schlecht handhabbar. Darüber hinaus verdampft bei der Probenahme und Abfüllung in ein Gefäß ein Teil des überhitzten Wassers, wodurch die Konzentration der Verunreinigungen in der verbleibenden Wasserprobe ansteigt und das Analyseergebnis verfälscht wird. Zur Entnahme heißer Wasserproben werden daher spezielle **Probenahmekühler** eingesetzt, in denen die Wasserprobe auf Umgebungstemperatur heruntergekühlt wird.

Nach der Probenahme muss die gekühlte Wasserprobe ohne weitere Verzögerung **analysiert** werden. Der Kontakt mit Umgebungsluft verändert die

Probe. Insbesondere die Aufnahme von Kohlendioxid aus der Luft führt bei sehr reinem Wasser dazu, dass der pH-Wert merklich absinkt und die Leitfähigkeit ansteigt (vgl. Kapitel 2).

Die in der Praxis verwendeten Messgeräte zur Erfassung des pH-Wertes und der Leitfähigkeit sind sehr sensibel und können durch eine Fehlbedienung schnell unbrauchbar gemacht werden. Speziell bei Leitfähigkeitsmessungen ist unbedingt auf den Messbereich des Gerätes zu achten, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Wird eine Leitfähigkeitselektrode für geringe Leitfähigkeiten einmal in eine Lösung mit zu hoher Leitfähigkeit getaucht, ist das Gerät nicht mehr verwendbar. Benutzen Sie daher bei Proben unbekannter Leitfähigkeit immer zuerst ein Messgerät mit einem Messbereich für hohe Leitfähigkeiten. Erst wenn sich hierbei eine so geringe Leitfähigkeit ergibt, dass eine Elektrode für geringe Leitfähigkeiten gefahrlos verwendet werden kann, verwenden Sie diese zur exakten Bestimmung des Leitwerts.

Wird die Wasserprobe nicht vor Ort analysiert sondern zur Analyse verschickt, muss sie **lagerfähig** sein. Achten Sie darauf, das Probenahmegefäß möglichst vollständig zu füllen und sofort zu verschließen, um den Kontakt der Wasserprobe mit Umgebungsluft zu minimieren.

WEITERFÜHRENDE LITERATUR

EN 285	EN 285:2015+A1:2021 – Sterilisation - Dampf-Sterilisatoren - Groß-Sterilisatoren
DIN 1717	DIN EN 1717:2011-08- Schutz des Trinkwassers vor Verunreinigungen in Trinkwasser-Installationen und allgemeine Anforderungen an Sicherungseinrichtungen zur Verhütung von Trinkwasserverunreinigungen durch Rückfließen
DIN 58946	DIN 58946-7:2014 – Sterilisation - Dampf-Sterilisatoren - Teil 7: Bauliche Anforderungen sowie Anforderungen an Betriebsmittel und den Betrieb von Dampfsterilisatoren im Gesundheitswesen
DIN 58950	DIN 58950-7:2011 – Dampf-Sterilisatoren für pharmazeutische Sterilisiergüter - Teil 7: Anforderungen an die Betriebsmittel und bauliche Anforderungen
DIN 58951	DIN 58951-2:2018 – Sterilisation - Dampf-Sterilisatoren für Labor-Sterilisiergüter - Teil 2: Geräteanforderungen, bauliche Anforderungen und Anforderungen an die Betriebsmittel
AGFW17	AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.: Checklisten zur Planung und Auslegung von Entgasungsanlagen, Juli 2017
BIER97	Bierwerth, W.: Tabellenbuch Chemietechnik, Verlag Europa-Lehrmittel, 1997
DENN11	Dennhöfer, E; Meurer, S; Meurer, M: Wissenswertes über die Dampfsterilisation im Gesundheitswesen; F. & M. Lautenschläger, 8. Auflage, 2011
DGSV22	Fachausschuss Hygiene, Bau und Technik der Deutschen Gesellschaft für Sterilgutaufbereitung: Anforderungen für den Bau oder Umbau einer Aufbereitungseinheit für Medizinprodukte (AEMP), Teil 17, Wasseraufbereitung für die AEMP, Zentralsterilization, 30 (2022) 4
MEUR08	Meurer, S: Überwachung der Dampfqualität - Der vierte Parameter der Dampfsterilisation/ Monitoring of Steam Quality - The 4th Parameter of Steam Sterilization; Forum 2008, mhp Verlag
WRMG07	Gesetz über die Umweltverträglichkeit von Wasch- und Reinigungsmitteln (Wasch- und Reinigungsmittelgesetz - WRMG) vom 29.04.2007, zuletzt geändert am 27.7.2021

DER AUTOR

Dr.-Ing. Markus Meurer studierte in Dortmund Chemieingenieurwesen und promovierte danach am Lehrstuhl für Anlagentechnik der Universität Dortmund auf dem Gebiet der Adsorptions- und Reaktionstechnik. Seit 1997 war er in der Messer-Gruppe und bei Air Liquide zunächst als Verfahreningenieur und später als Projektleiter im gasetechnischen Anlagenbau tätig. 2005 kam er als Mitglied der Geschäftsleitung zu F. & M. Lautenschläger. Er ist dort insbesondere für Projektabwicklung, Vertrieb und technische Entwicklung zuständig.

DER HERAUSGEBER

Innovative Technik für Medizin & Hygiene seit 1888 - Seit mittlerweile mehr als 130 Jahren sind Lautenschläger-Produkte in der Hygiene, Medizin und Labortechnik weltweit anerkannt.

Als einer der führenden Hersteller von Desinfektions- und Sterilisationsanlagen für Krankenhäuser und Praxen, Institute und Laboratorien, pharmazeutische Anwendungen und die Industrie bietet Lautenschläger heute individuelle Systemlösungen an, die sich exakt an den technischen und wirtschaftlichen Anforderungen von Kunden und Nutzern orientieren. Hierbei steht die ständige Weiterentwicklung, Verbesserung und Erweiterung der Produktpalette und des Serviceangebots im Vordergrund. Wir wollen immer einen kleinen Schritt voraus sein. Tradition verpflichtet zu Qualität!

Hauptsitz der Lautenschläger-Gruppe ist der Kölner Süden. Die enge Vernetzung von Entwicklung, Fertigungsbetrieb, Kundendienst und Projektierung an diesem Standort gibt uns die Möglichkeit einer jederzeit optimalen Projektbetreuung und der Sicherstellung höchster Qualitätsstandards für unsere Produkte.

WASSERDAMPFTABELLE

°C	mbar	°C	mbar
-10	2,6		
- 5	4,0		
0	6,1		
1	6,6	51	130
2	7,1	52	136
3	7,6	53	143
4	8,1	54	150
5	8,7	55	158
6	9,4	56	168
7	10,0	57	173
8	10,7	58	182
9	11,5	59	190
10	12,3	60	199
11	13,1	61	209
12	14,0	62	218
13	15,0	63	229
14	16,0	64	239
15	17,1	65	250
16	18,2	66	262
17	19,4	67	273
18	20,6	68	286
19	22,0	69	299
20	23,4	70	312
21	24,9	71	325
22	26,4	72	340
23	28,1	73	355
24	29,9	74	370
25	31,7	75	387
26	33,6	76	402
27	35,7	77	419
28	37,8	78	437
29	40,1	79	455
30	42,5	80	474
31	44,9	81	493
32	47,6	82	513
33	50,3	83	534
34	53,2	84	556
35	56,3	85	578
36	59,4	86	601
37	62,7	87	625
38	66,2	88	650
39	69,9	89	675
40	73,8	90	701
41	77,8	91	728
42	82,0	92	756
43	86,4	93	785
44	91,0	94	815
45	95,9	95	845
46	101	96	887
47	106	97	909
48	112	98	943
49	117	99	977
50	123	100	1013

DICHTEN VON WASSER

°C	bar	°C	kg/m ³
		0,0	999,8
		5,0	1000,0
		10,0	999,7
		15,0	999,1
101	1,05	20,0	998,2
102	1,09	25,0	997,0
103	1,13	30,0	995,7
104	1,17	35,0	994,0
105	1,21	40,0	992,2
106	1,25	45,0	990,2
107	1,29	50,0	988,0
108	1,34	55,0	985,7
109	1,39	60,0	983,2
110	1,43	65,0	980,6
111	1,48	70,0	977,8
112	1,53	75,0	974,8
113	1,58	80,0	971,8
114	1,64	85,0	968,6
115	1,69	90,0	965,3
116	1,75	95,0	961,9
117	1,80	99,63	958,7
118	1,86		
119	1,92		
120	1,99		
121	2,05		
122	2,11		
123	2,18		
124	2,25		
125	2,32		
126	2,39		
127	2,47		
128	2,54		
129	2,62		
130	2,70		
131	2,78		
132	2,87		
133	2,95		
134	3,04		
135	3,13		
136	3,22		
137	3,32		
138	3,41		
139	3,51		
140	3,61		
145	4,15		
150	4,76		
155	5,43		
160	6,18		
165	7,00		
170	7,92		
175	8,92		
180	10,02		
185	11,23		
190	12,54		

- 1888 Erster Krankenhaus-Wäschesterilisator der Welt
- 1900 Dampfdesinfektionsapparat als Raumteiler
- 1910 Weltweit erste komplett eingebaute Sterilisieranlage
- 1920 Schranksterilisator mit Zentralriegel-Verschlusstür, durch DRP und Auslandspatente geschützt
- 1928 In Zusammenarbeit mit Konrich entwickelter Wäsche- und Hochdruckdampfsterilisator
- 1931 Patentierter Wäsche- und Verbandstoffsterilisator mit Luftabschneider
- 1940 Patentiertes Lautenschläger-Blitzverfahren für OP-Wäsche
- 1967 Erste ohne Werkzeug auswechselbare Sterilisierautomatik
- 1968 Beginn der Fertigung von Sterilisatoren nach dem Baugruppen-Prinzip in Köln
- 1972 Sterilisierautomat mit automatischer Förderung durch kuppelbare Fahrwagen-Systeme
- 1988 Kühlturm zur Betriebswasserersparnis
- 1996 Patentierte Hohldichtung und patentierter Dampfanalysator
- 2002 Verbesserte Bedienerfreundlichkeit durch großflächige Touch-Panel
- 2011 Module zur Ressourcenschonung und Energieintegration in der ZSVA
- 2015 Hocheffizientes Betriebswassersparsystem für Dampfsterilisatoren
- 2020 Erweiterung der Reindampferzeugerpalette bis 350 kW und 10 bar