

Vogel Fachbuch

Kamprath-Reihe

Walter Wagner

# Wasser und Wasserdampf im Anlagenbau

---

Walter Wagner

Wasser und Wasserdampf im Anlagenbau

---

Kamprath-Reihe

Dipl.-Ing. Walter Wagner

# Wasser und Wasserdampf im Anlagenbau

2., korrigierte und erweiterte Auflage

Vogel Buchverlag

---

Dipl.-Ing. WALTER WAGNER

Jahrgang 1941, absolvierte nach einer Lehre als Technischer Zeichner ein Maschinenbaustudium und war 1964 bis 1968 Anlagenplaner im Atomreaktorbau; nach einer Ausbildung zum Schweiß-Fachingenieur war er ab 1968 Technischer Leiter im Apparatebau, Kesselbau und in der Wärmetechnik. 1974 bis 1997 bekam Walter Wagner einen Lehrauftrag an der Fachhochschule Heilbronn, von 1982 bis 1984 zusätzlich an der Fachhochschule Mannheim und von 1987 bis 1989 an der Berufsakademie Mosbach. Im Zeitraum 1988 bis 1995 war er Geschäftsführer der Hoch-Temperatur-Technik Vertriebsbüro Süd GmbH. Seit 1992 ist er Leiter der Beratung und Seminare für Anlagentechnik: WTS Wagner-Technik-Service. Walter Wagner ist außerdem Obmann verschiedener DIN-Normen und öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Wärmeträgertechnik, Thermischer Apparatebau und Rohrleitungstechnik.

Dipl.-Ing. WALTER WAGNER ist Autor folgender Vogel Fachbücher der Kamprath-Reihe:

Festigkeitsberechnungen im  
Apparate- und Rohrleitungsbau  
Kreiselpumpen und Kreiselpumpenanlagen  
Lufttechnische Anlagen  
Planung im Anlagenbau  
Regel- und Sicherheitsarmaturen  
Rohrleitungstechnik  
Strömung und Druckverlust  
Wärmeaustauscher  
Wärmeträgertechnik  
Wärmeübertragung  
Wasser und Wasserdampf im Anlagenbau  
DIETZEL/WAGNER: Technische Wärmelehre  
HEMMING/WAGNER: Verfahrenstechnik

---

**Weitere Informationen:**  
[www.vogel-buchverlag.de](http://www.vogel-buchverlag.de)

---

ISBN 978-3-8343-3194-6

2. Auflage. 2011

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten.  
Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Germany

Copyright 2003 by Vogel Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg

---

# Vorwort

---

Wasser und Wasserdampf sind die gebräuchlichsten Energieträger im Anlagenbau. Obwohl die Anwendung dieses Fluids seit Jahrhunderten bekannt ist, stellen sich, was Auslegung und Konstruktion dieser Anlagen betrifft, immer wieder Fragen. Bedingt durch die im Laufe der Zeit teilweise Verschlechterung des Rohwassers und die oft ohne Reserven ausgelegten Energiesysteme, wird der Einfluss der Dampfreinheit, der nicht kondensierbaren Gasanteile (Inertgase) sowie die effektive Kondensatableitung für die Funktionsfähigkeit der Systeme immer wichtiger. Zusätzlich spielt die Korrosion in Verbindung mit den Konstruktionswerkstoffen eine wichtige Rolle. Wie man Probleme im Anlagenbau diesbezüglich lösen kann, wird hier anschaulich beschrieben.

In Firmenschriften aus diesem Bereich werden Einzelprobleme und Lösungen oftmals sehr anschaulich dargestellt. Insbesondere die Unterlagen der Firmen GESTRA, Sarco, Armstrong und Berkeley-Filter sind für den praktischen Gebrauch zu empfehlen. Meistens wird dabei jedoch nur der Bereich behandelt, den das Lieferprogramm der Firmen abdeckt. Aus solchen Unterlagen teilweise verwendete Informationen wurden nur im Hinblick auf den Gesamtanwendungsbereich übernommen.

Entscheidend bei der Auslegung und Konstruktion sind die physikalischen Gesetzmäßigkeiten. Insbesondere der «feste» Zusammenhang von Temperatur und Dampfdruck des Wassers ist oftmals der «Schlüssel» zur Auslegung bzw. zur Beurteilung eines Wasserdampf- und Kondensatnetzes.

Mit den Informationen aus dem Buch können Studenten an Universitäten und Fachhochschulen der Fachrichtungen Heizungstechnik, Verfahrenstechnik, Versorgungstechnik, Kraftwerkstechnik, Umwelttechnik und Maschinenbau technische Zusammenhänge besser verstehen und entsprechende Aufgaben leichter lösen. Projektierungs-, Konstruktions- und Betriebsingenieure sowie Techniker, die im Beruf mit der Planung, Auslegung und Beurteilung von Wasser- und Wasserdampfsystemen im betrieblichen Einsatz zu tun haben, erhalten viele wichtige Hinweise aus der Praxis für die Praxis. Aussagekräftige Tabellen, Diagramme und Zeichnungen vermitteln dem Praktiker genaue Vorstellungen von Abläufen. Stoffdaten, Berechnungen, und Zustandsbeschreibungen unterstützen Planung, Auslegung und Konstruktion.

Resonanz aus Leserkreisen ist mir stets willkommen (E-Mail: [wagner@wts-online.de](mailto:wagner@wts-online.de)). Dem Vogel Buchverlag danke ich für die gewohnt hervorragende Zusammenarbeit.



---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Vorwort</b> . . . . .	5
<b>1 Rohwasser</b> . . . . .	9
<b>2 Anwendungsgrenzen von Rohwasser</b> . . . . .	11
2.1 Ablagerungen . . . . .	11
2.1.1 Kalkablagerungen (Steinbildung) . . . . .	11
2.2 Korrosion . . . . .	11
2.2.1 Gleichmäßige Flächenkorrosion . . . . .	12
2.2.2 Ungleichmäßige Flächenkorrosion . . . . .	12
2.2.3 Korrosion an Wandungen von freien Wasseroberflächen . . . . .	12
2.2.4 Korrosion bei einmaliger Wasserfüllung . . . . .	13
2.3 Gasbildung . . . . .	13
<b>3 Wasseraufbereitung</b> . . . . .	15
3.1 Begriffe zur Beurteilung von Wasser . . . . .	15
3.1.1 Allgemeine Einheiten . . . . .	15
3.1.2 pH-Wert . . . . .	17
3.1.3 Härte . . . . .	19
3.1.4 Kohlensäure . . . . .	20
3.1.5 Säure- und Basekapazität . . . . .	20
3.1.6 Elektrische Leitfähigkeit . . . . .	21
3.1.7 Wasseranalyse . . . . .	21
3.1.7.1 Beurteilung einzelner Analysenwerte . . . . .	22
3.2 Aufbereitungssysteme . . . . .	23
3.2.1 Ionenaustauscher . . . . .	24
3.2.2 Umkehrosmose . . . . .	25
3.2.3 Entgasung . . . . .	25
3.2.4 Absalzung . . . . .	27
3.3 Grenzwerte für die Wasserbeschaffenheit . . . . .	27
3.3.1 Kühlwasser . . . . .	27
3.3.2 Wasser für Kesselanlagen . . . . .	29
<b>4 Stoffwerte von Wasser und Wasserdampf</b> . . . . .	33
4.1 Siedeverlauf . . . . .	34
4.2 Dichte . . . . .	34
4.3 Wahre spezifische Wärmekapazität . . . . .	35
4.4 Wärmeleitfähigkeit . . . . .	35
4.5 Dynamische Viskosität . . . . .	39
4.6 Enthalpie-Diagramme . . . . .	39
4.7 Entropie-Diagramme . . . . .	39
4.8 Wasser- und Wasserdampftabellen . . . . .	48
<b>5 Strömung und Wärmeübertragung</b> . . . . .	53
5.1 Strömungsgeschwindigkeit . . . . .	53
5.2 Strömungskennzahlen . . . . .	53
5.3 Druckverluste . . . . .	58
5.4 Wärmeübergangskoeffizienten . . . . .	58
5.4.1 Durchströmte Rohre . . . . .	58
5.4.2 Quer angeströmte Rohre . . . . .	58
5.4.3 Naturkonvektion an Platten und Rohren . . . . .	62

5.4.4	Verdampfung von Wasser	62
5.4.5	Kondensation von Wasserdampf	62
<b>6</b>	<b>Wasseranlagen</b>	<b>65</b>
6.1	Wasseranlagen unter 0°C	65
6.1.1	Wasser-Salz-Lösungen (Solen)	65
6.1.2	Wasser-Glykol-Lösungen	66
6.2	Kühlwasseranlagen	69
6.3	Warmwasseranlagen	77
6.4	Heißwasseranlagen	78
<b>7</b>	<b>Wasserdampfanlagen</b>	<b>81</b>
7.1	Erzeugung von Wasserdampf	81
7.1.1	Rauchrohrkessel	83
7.1.2	Wasserrohrkessel	83
7.1.3	Naturumlaufkessel	83
7.1.4	Zwangumlaufkessel	85
7.1.5	Zwangdurchlaufkessel	85
7.1.6	Indirekt beheizte Dampferzeuger	85
7.1.7	Ausdampftrommel	86
7.2	Dampfspeicher	86
7.3	Dampftrockner	89
7.4	Dampfleitungen	90
7.4.1	Wärmeverlustberechnung	90
7.4.2	Temperaturabfall im Rohr	91
7.4.3	Kondensatanfall im Rohr	92
7.4.4	Kondensatvermeidung während des Betriebs	94
7.5	Drosselung von Wasserdampf	97
7.6	Dampfkühlung	100
7.7	Inertgase im Dampf	100
<b>8</b>	<b>Kondensatsystem</b>	<b>103</b>
8.1	Allgemeines	103
8.2	Ableitsysteme	106
8.2.1	Kondensatabführung	106
8.3	Kondensatableiter	107
8.3.1	Bauarten von Kondensatableitern	108
8.3.1.1	Schwimmerkondensatableiter	108
8.3.1.2	Thermische Ableiter	109
8.3.1.3	Thermodynamische Ableiter	110
8.4	Sammelsystem und Rückführung	111
8.5	Verlegung von Kondensatleitungen	117
<b>9</b>	<b>Dampf- und Kondensatsysteme für verschiedene Einsatzfälle</b>	<b>127</b>
9.1	Entwässerung von Dampfleitungen	127
9.2	Kondensatableitung an Lufterhitzern	127
9.3	Kondensatableitung aus dampfbeheizten Wärmeaustauschern mit Produkttemperaturen <100°C	130
9.4	Dampfseitige Regelung von Wärmeaustauschern	132
9.5	Kondensatanstauregelung	132
9.6	Korrosionsschäden an Wärmeaustauschern	135
9.7	Vermeiden von Frostschäden in Wasserdampf- und Kondensatsystemen	136
	<b>Formelzeichen</b>	<b>137</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>139</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>141</b>

---

# 1 Rohwasser

---

Wasser kommt in der Natur nicht rein vor, sondern enthält je nach Herkunft (Meer-, See-, Fluss-, Brunnen- oder Regenwasser) unterschiedliche Stoffe. Diese Stoffe können sowohl als Salze, freie Säuren, Staub, organische Teile bzw. auch als Gase gelöst oder suspendiert sein und beeinflussen je nach Menge und Art das Verhalten von Wasser.

Da die Lösungsfähigkeit dieser Stoffe in Wasser temperaturabhängig ist, können sowohl Abscheidungen als auch Stoffaufnahmen stattfinden.

Außerdem sind im Rohwasser oft noch ungelöste Stoffe anorganischer und organischer Zusammensetzung als Schwebstoffe oder absetzbare Stoffe enthalten. Um Ablagerungen, Ausgasungen und Korrosion in den Anlagenbauteilen zu vermeiden, werden bestimmte Güteeigenschaften von Wasser gefordert.

**Regenwasser** ist als Sonderrohwasser anzusehen, da dieses Wasser nach der Verdunstung und anschließenden Kondensation (Regen) ohne Bodendurchströmung zur Anwendung kommt und somit Beimengungen stark reduziert sind.

**Brunnen- und Oberflächenwasser** enthält immer auch Sand, wobei Brunnenwasser bis zu 0,3 mg/l Sand enthalten kann.

**Mineralwasser** ist aus Quellen gewonnenes Wasser, das mindestens 1000 mg/l gelöste Salze oder 250 mg/l freies Kohlendioxid enthält.

**Meerwasser** hat etwa folgende Massenanteile an gelösten Salzen:

Ozeane	3,3...3,75%
Nordsee	3,2%
Ostsee	0,6...1,9%
Mittelmeer	3,8%
Totes Meer	21,7%

Die Salzgehalte liegen im Durchschnitt bei Ozeanen:

NaCl	29,60 g/l
MgCl <sub>2</sub>	3,80 g/l
MgSO <sub>4</sub>	2,25 g/l
CaSO <sub>4</sub>	1,38 g/l

Neben den angegebenen Salzen sind noch Verbindungen von Kalium, Brom, Strontium, Bor und Fluor vorhanden.

Der Sauerstoffgehalt schwankt zwischen 0...8,5 mg/l.

Kohlendioxid ist in beträchtlichen Mengen im Meerwasser gespeichert und hält den pH-Wert des Wassers nahezu konstant bei 7,8...8,3.

Entsprechend des hohen Salzgehaltes liegt die elektrische Leitfähigkeit bei 21000...52000 µS/cm mit einem Durchschnittswert von 42000 µS/cm.

Im Persischen Golf liegt die Leitfähigkeit bei 72000 µS/cm.

Meerwasser ist sowohl durch seinen Sauerstoffgehalt als auch durch die seine Leitfähigkeit bewirkende Salze aggressiv und bildet wegen seines Chloridgehaltes keine wirksame Schutzschichten.

**Brackwasser** ist eine an den Flussmündungen vorkommende, abhängig von Gezeiten und Wasserstand stark schwankende Mischung von Süßwasser und Meerwasser, mit einer Leitfähigkeit die bis zu ca. 32000 µS/cm ansteigen kann und mit oft stark materialangreifenden Eigenschaften. Die Werkstoffauswahl richtet sich nach der Analyse.

**Sole** ist salzhaltiges Wasser mit mindestens 14 g/l Salze (hauptsächlich Natriumchlorid).



## 2 Anwendungsgrenzen von Rohwasser

Durch die Bestandteile des Rohwassers sowie die Konstruktionswerkstoffe der Anlage und deren Betriebsbedingungen kann es zu Ablagerungen, Korrosion und Gasabscheidungen kommen.

### 2.1 Ablagerungen

Ablagerungen bilden sich einmal durch die festen Bestandteile im Wasser sowie durch die Abscheidung von gelösten Stoffen, wobei hier Salze, Kalk und Gips die entscheidenden Anteile darstellen.

Die Verwendung von Rohwasser ist bis zu einer Temperatur von rund 60 °C möglich, bei einem Gehalt an Salz von 0,2...0,5 g/l. Beim Überschreiten dieser Temperatur scheiden sich aber die vorher gelösten Salze ab. Es bildet sich «Wasserstein» bzw. bei Temperaturen über 100 °C sog. «Kesselstein», der sich an den Wandungen festsetzt, den Wärmeübergang somit hindert und durch seine geringe Wärmeleitfähigkeit auch Wärmespannungen in den Heizflächen erzeugt. Bei Rohrleitungen ist außerdem die Verengung des lichten Querschnittes nachteilig.

Die Bestandteile des «Kesselsteins» sind überwiegend:

Calciumcarbonat (Kalk)	CaCO <sub>3</sub> weich und leicht löslich
Magnesiumcarbonat	MgCO <sub>3</sub> weich und leicht löslich
Calciumsulfat (Gips)	CaSO <sub>4</sub> hart und schwer löslich
Calciumsilikat	CaSiO <sub>3</sub> sehr hart und nahezu unlöslich

Die im Wasser enthaltenen Salze (Erdalkali-, Alkali- und Schwermetallsalze) sind vor allem Carbonate (kohlen saure Salze) und Bikarbonate (doppelkohlen saure Salze), Chloride (salzsaure Salze) sowie Nitrate des Calciums und des Magnesiums.

#### 2.1.1 Kalkablagerungen (Steinbildung)

Unter Steinbildung versteht man Beläge aus Calciumcarbonat auf wasserführenden Wandungen. Im Gegensatz zur Korrosion spielen bei der Steinbildung die Eigenschaften des Werkstoffes nur eine untergeordnete Rolle.

Zur Steinbildung kommt es aufgrund der Reaktion:



wenn Wasser erwärmt wird.

Die Kalkablagerung wird durch die Menge von im Wasser gelösten Calciumhydrogencarbonat bestimmt.

### 2.2 Korrosion

Die Korrosion in wässrigen Lösungen ist meist durch elektronische Vorgänge bedingt. Bei einem elektrochemischen Vorgang treten Potentialunterschiede in räumlich verschiedenen Bezirken der Metalloberfläche auf, sodass eine katodische und anodische Reaktion ablaufen kann.

An der Anode gehen bei der Korrosion die Atome des Anodenmetalls als positive Ionen in Lösung. Ordnet man die Metalle nach ihrem Lösungspotential, so erhält man die elektrolytische Spannungsreihe, bei der die wasserstoffumspülte Platinelektrode das Potential 0 besitzt (Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1 Elektrolytische Spannungsreihe (von technisch wichtigen Metallen)

Element	Mg	Al	Zn	Fe	Cd	Ni	Sn	Pb	H <sub>2</sub>	Cu	Ag	Pt	Au
Spannung V	-2,37	-1,66	-0,76	-0,44	-0,40	-0,23	-0,14	-0,13	±0,00	+0,34	+0,80	+1,2	+1,5

Je negativer das Potential, desto unedler ist das Metall. Bei Anwesenheit eines Elektrolyten wird immer das unedle Metall angegriffen. Demnach wird ein verzinnter (Sn) Stahl unter der Deckschicht korrodieren (rosten), wenn diese Deckschicht Poren aufweist.

Dagegen rosten verzinkte (Zn) Stahlteile erst, wenn der Überzug in größeren Bereichen verschwunden ist. Eine Potentialdifferenz bildet sich nicht nur zwischen verschiedenen Metallen aus, sondern es können sich auch innerhalb eines einheitlichen Metallstücks Bereiche mit unterschiedlichem Potential bilden. Solche Stellen verschiedenen Potentials (Lokalelement) entstehen beispielsweise, wenn Gefügeinhomogenitäten oder örtliche Kaltverformungen vorliegen.

Nach der Erscheinungsform des Korrosionsangriffes kann man in gleichmäßig abtragende Korrosion und ungleichförmig (lokalisiert) angreifende Korrosion einteilen, wobei in der Regel nur die lokalisiert angreifende Korrosion für Schadensfälle bedeutsam ist.

### 2.2.1 Gleichmäßige Flächenkorrosion

Eine gleichmäßige Flächenkorrosion findet in sauerstoffhaltigen Wässern immer statt. Die Geschwindigkeit der Korrosion wird i.A. durch Deckschichten wesentlich verringert, sodass die Abtragungsraten meist technisch toleriert wird.

Bei fehlender Schutzschicht wird die Korrosionsgeschwindigkeit durch die Konzentration der Oxidationsmittel  $c(\text{O}_2)$ ,  $c(\text{NO}_3^-)$  und  $c(\text{H}^+)$ , bei Anwesenheit von sulfatreduzierenden Bakterien auch  $c(\text{SO}_4^{2-})$  und durch die Strömungsgeschwindigkeit bestimmt.

### 2.2.2 Ungleichmäßige Flächenkorrosion

Ungleichförmige Flächenkorrosion unter Ausbildung von Mulden- und Lochfraß tritt immer auf, wenn keine Schutzschichten, aber unvollständige Deckschichten entstehen. Das ist bei den meisten sauerstoffhaltigen Wässern der Fall. Das Ausmaß des örtlichen Angriffes hängt von zahlreichen Einflussgrößen, insbesondere von den geometrischen Abmessungen des Bauteils sowie von der Oberflächenbeschaffenheit und von den Anfangsbedingungen der Korrosion ab.

### 2.2.3 Korrosion an Wandungen von freien Wasseroberflächen

An Metallwänden an denen eine Grenzfläche von Wasser und Luft besteht, ist bevorzugt Korrosion durch Elementbildung möglich. Um diese Korrosion zu vermeiden, gibt es folgende Möglichkeiten:

- Korrosionsbeständige Werkstoffe zu verwenden,
- Abdeckung der freien Oberfläche mit einer Membrane,
- Luft durch ein Inertgas zu ersetzen (z.B. Stickstoff N<sub>2</sub>),
- Säurebildner, wie z.B. Chlor in den Salzen, aus dem Wasser zu entfernen.

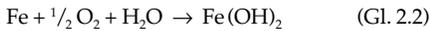
Eine der meisten praktizierten Möglichkeiten ist die Membranabdeckung der freien Wasseroberfläche und falls noch ein Systemüberdruck erforderlich ist, diesen Druck mittels z.B. Stickstoff zu erzeugen. Hierdurch wird vermieden, dass Sauerstoff (bei Luft als Druck-erzeuger) durch die Membrane diffundiert und so in das Wasser gelangen kann.

## 2.2.4 Korrosion bei einmaliger Wasserfüllung

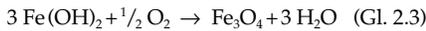
Bei Wassersystemen ohne ständige Wassererneuerung, bei denen der im Wasser gelöste Sauerstoff und die Kohlensäure durch Korrosion verbraucht wird, hängt die verbleibende Korrosivität des Wassers alleine davon ab, in welchem Maße Sauerstoff aus der Atmosphäre in die Anlage gelangen kann.

### Beispiel

Stahl reagiert mit sauerstoffhaltigem Wasser zunächst gemäß:



zu **Eisenhydroxid**  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , das sich weiter umwandelt:



zu **Magnetit**  $\text{Fe}_3\text{O}_4$

Bei luftgesättigtem Wasser beträgt der Sauerstoffgehalt ca. 10 mg/l. Aus obiger Gleichung ergibt sich, dass 1 m<sup>3</sup> luftgesättigtes Wasser ca. 26 g Eisen umwandeln. Rechnet man diese Eisenmenge auf die Geometrie in einem Rohr DN 25 mit 1 m Länge und mit einem Wasservolumen von 0,6 l um, ergibt sich bei gleichmäßiger Korrosion eine Wanddickenschwächung von 0,02 µm. Eine einmalige mit Sauerstoff gesättigte Wasserfüllung bewirkt somit keine zu beachtende Korrosion.

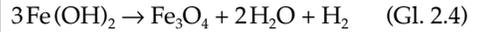
## 2.3 Gasbildung

Die Gaslöslichkeit in Wasser ist abhängig von Temperatur und Druck (Bild 2.1 und Bild 2.2). Gemäß dem Henry'schen Gesetz ist die Löslichkeit zum Druck proportional.

Durch Druck- und Temperaturunterschiede in der Anlage kommt es deshalb, insbesondere an Stellen mit niedrigem Druck und gleichzeitig erhöhter Temperatur, zu Gasabscheidungen im System.

## Wasserstoffbildung

Wenn der Sauerstoff des Wassers durch Korrosion verbraucht wird, kann es in Stahlrohrleitungen zur Bildung von Wasserstoff kommen:



Bei der chemischen Analyse des beim Entlüften anfallenden Gases, wird neben dem Wasserstoff auch Stickstoff festgestellt. Dies zeigt, dass der für die primäre Reaktion (Gl. 2.2) erforderliche Sauerstoff durch Eintritt von Luft in die Anlage gelangt ist. Ursache ist oftmals Unterdruck an irgendeiner Stelle in der Anlage.

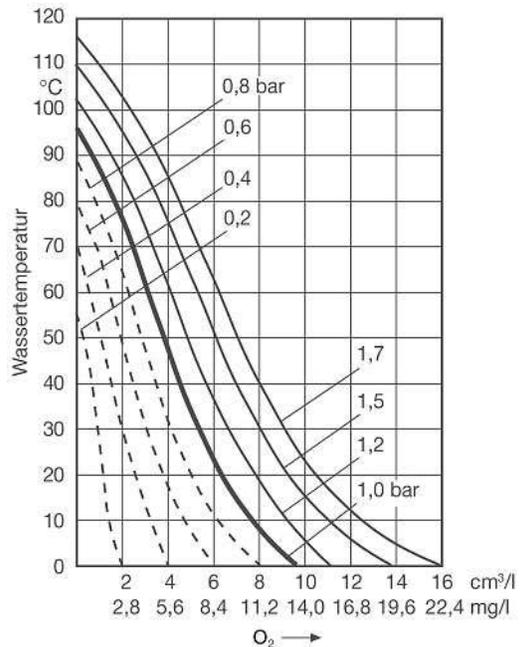


Bild 2.1 Löslichkeit für Sauerstoff in Wasser

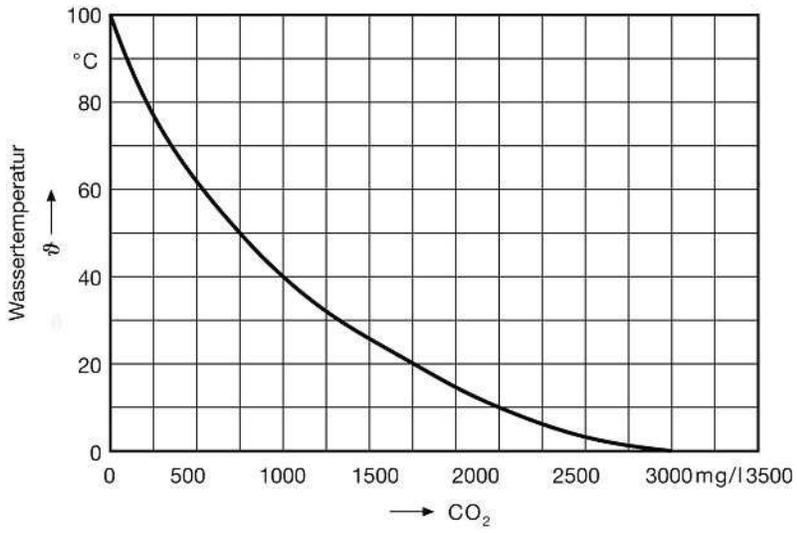


Bild 2.2 Löslichkeit von CO<sub>2</sub> in Wasser ( $p = 1$  bar)

---

# 3 Wasseraufbereitung

---

Zur Vermeidung von Ablagerungen, Korrosion und Gasausscheidungen, muss das Wasser im Anlagenbau aufbereitet werden.

Zur Beurteilung der Qualität des Wassers muss eine Analyse des Wassers vorliegen.

## 3.1 Begriffe zur Beurteilung von Wasser

### 3.1.1 Allgemeine Einheiten

#### Stoffmenge $n$

Die Basisgröße Stoffmenge beschreibt die Qualität einer Stoffportion auf der Grundlage der Anzahl der darin enthaltenen Teilchen bestimmter Art:

Die Einheit der Basisgröße wird mit **Mol** bezeichnet.

Die Stoffmenge einer Stoffportion ist 1 mol groß, wenn sie aus ebenso vielen Einzelteilchen besteht, wie Atome in 12 g des Kohlenstoffisotops  $^{12}\text{C}$  enthalten sind.

Die Stoffportion bezeichnet einen abgegrenzten Materienbereich – also eine bestimmte abgemessene Menge eines Stoffes, z. B. 2 kg Wasser.

Benutzt man die Basisgröße Stoffmenge, müssen die Einzelteilchen spezifiziert sein und können Atome, Moleküle, Ionen, Elektronen oder andere Teilchen oder Gruppen von Teilchen genau angegebener Zusammensetzung sein.

Die Angabe erfolgt als Größengleichung:

$$n(\text{H}_2\text{SO}_3) = 3,5 \text{ mol}$$

$$n(\text{Cl}^-) = 0,1 \text{ mol}$$

#### Äquivalent

Ein Äquivalent ist der gedachte Bruchteil  $\frac{1}{z}$  eines Teilchens  $X$  im Sinne der Mol-Definition,

wobei  $X$  ein Atom, Molekül, Ion oder eine Atomgruppe sein kann.

- Ionenäquivalent** durch die Ladungszahl des Ions,
- Neutralisationsäquivalent** durch die Anzahl der  $\text{H}^+$ -Ionen oder  $\text{OH}^-$ -Ionen, die es bindet oder ersetzt,
- Redoxäquivalent** durch die Anzahl der pro Teilchen abgegebenen oder aufgenommenen Elektronen.

Für die symbolische Darstellung von Äquivalenten wird der Bruchteil  $\frac{1}{z}$  vor das Symbol des Teilchens  $X$  gesetzt:

$$\frac{1}{z} X$$

$$\text{Beispiele: } \frac{1}{2} \text{Ca}^{2+}, \frac{1}{2} \text{H}_2\text{SO}_4, \frac{1}{5} \text{KMnO}_4$$

#### Molare Masse

Die molare Masse eines Stoffes  $X$  ist der Quotient aus seiner Masse  $m(X)$  und seiner Stoffmenge  $n(X)$ :

$$M(X) = \frac{m(X)}{n(X)}$$

Zur Angabe der molaren Massen von Stoffen als Größengleichung werden die Symbole für deren Teilchen in Klammern hinter das Formelzeichen  $M$  gesetzt.

$$M(\text{H}) = 1,008 \text{ g/mol}$$

$$M(\text{H}_2) = 2,016 \text{ g/mol}$$

$$M(\text{NaOH}) = 40,00 \text{ g/mol}$$

Die Molmassen der wichtigsten Wasserinhaltsstoffe gibt Tabelle 3.1 wieder.

#### Massenanteil $w$

Der Massenanteil  $w$  eines Stoffes  $X$  in einer Mischung ist der Quotient aus seiner Masse  $m(X)$  und der Masse  $m$  der Mischung:

Tabelle 3.1 Molmassen der wichtigsten Wasserinhaltsstoffe in g/mol

Calcium	M(Ca <sup>2+</sup> )	40,1	(1 mg/l Ca <sup>2+</sup> $\triangleq \frac{1}{40,1} = 0,0249 \text{ mol/m}^3$ )
Sulfat	M(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	96,1	(1 mg/l SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> $\triangleq \frac{1}{96,1} = 0,0104 \text{ mol/m}^3$ )
Sulfat	M( $\frac{1}{2}$ SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	48,0	(1 mg/l SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> $\triangleq \frac{1}{48} = 0,0208 \text{ mol/m}^3$ )
Chlorid	M(Cl <sup>-</sup> )	35,5	(1 mg/l Cl <sup>-</sup> $\triangleq \frac{1}{35,5} = 0,0282 \text{ mol/m}^3$ )
Nitrat	M(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	62,0	(1 mg/l NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> $\triangleq \frac{1}{62,0} = 0,0161 \text{ mol/m}^3$ )
Natrium	M(Na <sup>+</sup> )	23,0	(1 mg/l Na <sup>+</sup> $\triangleq \frac{1}{23} = 0,0435 \text{ mol/m}^3$ )
Mangan	M(Mn <sup>2+</sup> )	54,9	(1 mg/l Mn <sup>2+</sup> $\triangleq \frac{1}{54,9} = 0,0182 \text{ mol/m}^3$ )
Kieselsäure	M(SiO <sub>2</sub> )	60,1	(1 mg/l SiO <sub>2</sub> $\triangleq \frac{1}{60,1} = 0,0166 \text{ mol/m}^3$ )
Phosphor	M(P)	31,0	(1 mg/l P $\triangleq \frac{1}{31} = 0,0323 \text{ mol/m}^3$ )
	M(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	142,0	(1 mg/l P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> $\triangleq \frac{1}{142} = 0,0070 \text{ mol/m}^3$ )
	M(PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	95,0	(1 mg/l PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> $\triangleq \frac{1}{95} = 0,0105 \text{ mol/m}^3$ )

$$w(X) = m(X)/m$$

$$w(\text{NaOH}) = 0,50$$

$$w(\text{HCl}) = 40 \%$$

### Stoffmengenanteil $x$

Der Stoffmengenanteil  $x$  eines Stoffes in einer Mischung aus den Stoffen  $X$  und  $Y$  ist der Quotient aus seiner Stoffmenge  $n(X)$  und der Summe der Stoffmengen  $n(X)$  und  $n(Y)$ :

$$x(X) = n(X)/(n(X) + n(Y))$$

$$x(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = 0,35$$

### Volumenanteil $\Psi$

Der Volumenanteil  $\Psi$  eines Stoffes  $X$  in einer Mischung aus den Stoffen  $X$  und  $Y$  ist der Quotient aus seinem Volumen  $V(X)$  und der Summe der Volumina  $V(X)$  und  $V(Y)$  vor dem Mischvorgang:

$$\Psi(X) = V(X)/(V(X) + V(Y))$$

$$\Psi(\text{O}_2) = 0,21$$

### Massenkonzentration $\rho$

Die Massenkonzentration  $\rho$  eines Stoffes  $X$  in einer Mischung ist der Quotient aus seiner Masse  $m(X)$  und dem Volumen  $V$  der Mischung:

$$\rho(X) = m(X)/V$$

$$\rho(\text{H}_2\text{SO}_4) = 47 \text{ g/l}$$

### Stoffmengenkonzentration $c$

Die Stoffmengenkonzentration  $c$  eines Stoffes  $X$  in einer Mischung ist der Quotient aus seiner Stoffmenge  $n(X)$  und dem Volumen  $V$  der Mischung:

$$c(X) = n(X)/V$$

$$c(\text{Ca}^{2+}) = 1,8 \text{ mmol/l}$$

**Äquivalentkonzentration  $c(1/2 X)$** 

$$c(1/2 \text{Ca}^{2+}) = 0,48 \text{ mol/l}$$

**Volumenkonzentration  $\sigma$** 

Die Volumenkonzentration  $\sigma$  eines Stoffes X in einer Mischung ist der Quotient aus seinem Volumen  $V(X)$  und dem Volumen der Mischung:

$$\sigma(X) = V(X)/V$$

$$\sigma(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = 0,23$$

**3.1.2 pH-Wert**

Die Moleküle der chemischen Bestandteile wässriger Lösungen sind zum Teil in elektrisch geladene Teilchen mit entgegengesetzten Vorzeichen zerfallen.

Man bezeichnet diese Teilchen als Ionen, den Zerfall als Dissoziation und alle Lösungen, die Ionen enthalten, als Elektrolyte. Man nennt:

- positiv geladene Ionen → Kationen und
- negativ geladene Ionen → Anionen.

Metall- und Wasserstoffionen haben üblicherweise eine positive Ladung, z. B.:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{H}^+$ ,

Säurerest- und Hydroxidionen eine negative Ladung, z. B.:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{OH}^-$ .

Die Konzentration an Wasserstoffionen bestimmt den Charakter einer wässrigen Lösung, d. h., ob die Konzentration sauer oder basisch (alkalisch) reagiert bzw. neutral ist.

Der praktisch in Betracht kommende Konzentrationsbereich an  $\text{H}^+$ - bzw.  $\text{OH}^-$ -Ionen liegt zwischen den Werten von  $1 \dots 10^{-14}$  mol/l.

Da dieser Zahlenwert für den Gebrauch z. B. für grafische Darstellungen oft ungeeignet sind, wurde als Maßzahl der negative dekadische Logarithmus der Wasserstoffionen-Konzentration  $\text{H}^+$  mit der Bezeichnung **pH-Wert** eingeführt.

$$\text{pH} = -\lg(\text{H}^+), \text{ bzw. } \text{H}^+ = 10^{-\text{pH}} \text{ mol/l}$$

Das Produkt der Wasserstoffionen-Konzentration und der Hydroxidionen-Konzentration, das sog.

**Ionenprodukt**,  $K_w = \text{H}^+ \cdot \text{OH}^-$ ,

ist für wässrige Lösungen (auch für Säuren, Laugen und Salzlösungen) gleich und hängt im Wesentlichen nur von der Temperatur ab.

Das Produkt beträgt bei  $25^\circ\text{C}$  ca.  $10^{-14}$  mol/l.

Bei einer Erhöhung von  $\text{H}^+$  muss sich daher  $\text{OH}^-$  verringern und umgekehrt.

Lösungen deren Wasserstoffionen-Konzentration gleich der Hydroxidionen-Konzentration ist, reagiert neutral. Dieser Zustand liegt z. B. bei chemisch reinem Wasser vor. Bei der Bezugstemperatur von  $25^\circ\text{C}$  beträgt die Konzentration an Wasserstoff- und Hydroxidionen jeweils  $10^{-7}$  mol/l. Chemisch reines Wasser von  $25^\circ\text{C}$  mit einem pH-Wert 7 reagiert weder sauer noch alkalisch.

Sauer ist eine wässrige Lösung, deren Wasserstoffionen-Konzentration größer ist als die Hydroxidionen-Konzentration. Der pH-Wert ist damit kleiner als der pH-Wert einer neutralen Lösung bei gleicher Temperatur.

**Beispiel**

Wasserstoffionen-Konzentration  
 $= 0,000\ 000\ 000\ 001 \text{ mol/l}$  ( $10^{-12} \text{ mol/l}$ )  
 → pH-Wert = 12

Die pH-Skala (Tabelle 3.2) mit der Klassifizierung der chemischen Reaktionen reicht von 0...14 und bezieht sich auf Lösungen mit einer Bezugstemperatur von  $25^\circ\text{C}$ , andere Temperaturen erklärt Bild 3.1.

Wässrige Lösungen mit  $\text{pH} < 0$  werden als übersauer und Lösungen mit  $\text{pH} > 14$  als überalkalisch bezeichnet.

Bei einer Temperaturerhöhung ändert sich durch Zunahme der Dissoziation das Ionenprodukt  $K_w$ . Dabei nimmt  $\text{H}^+$  ebenso zu wie  $\text{OH}^-$ . Die Mengen der dissoziierten  $\text{H}^+$ - und  $\text{OH}^-$ -Ionen werden größer, dabei bleiben sie jedoch in ihrem Verhältnis zueinander gleich.

Tabelle 3.2 pH-Wert-Übersicht (Bezugstemperatur 25°C)

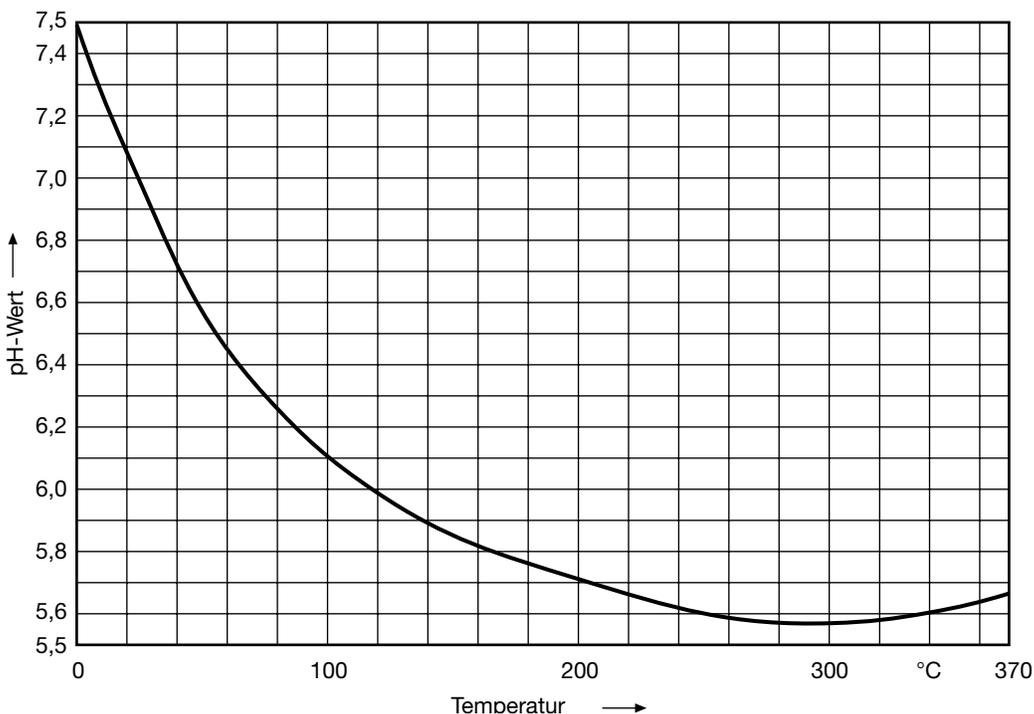
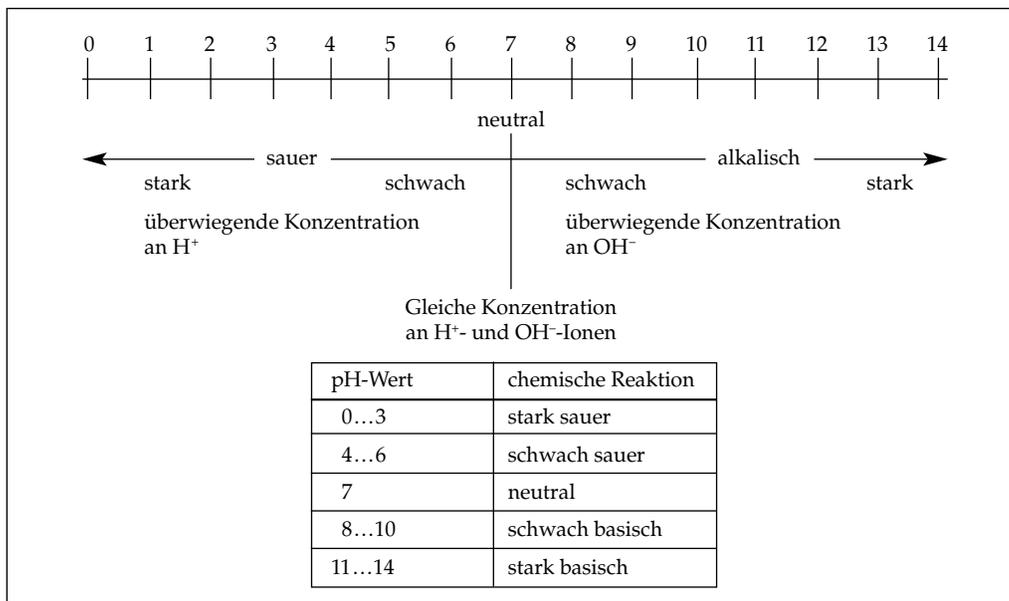


Bild 3.1 pH-Wert des chemisch reinen Wassers in Abhängigkeit von der Temperatur (Neutralkurve)

### 3.1.3 Härte

Die Härte eines Wassers ist der Gehalt an Erdalkalitionen (Calcium-, Magnesium-, Strontium- und Bariumionen).

Von praktischer Bedeutung sind die Calcium- und Magnesiumkonzentrationen. Calcium- und Magnesiumsalze kommen in erster Linie als Karbonate, Hydrogenkarbonate, Sulfate, Nitrate und Chloride vor.

Die Benennung «Wasserhärte» ist historisch auf die Reaktion der Calciumionen des Wassers beim Waschvorgang mit fettsauren Seifen zurückzuführen.

Die Härte (DIN 38409, T6) wird als Stoffmengenkonzentration der Erdalkalitionen angegeben, wie z. B. Stoffmengenkonzentration  $c(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) = 5 \text{ mmol/l}$ .

#### Umrechnung von deutschen Härtegraden in andere Maßeinheiten

Der Grad deutscher Härte (°dH) ist wie folgt definiert:

1 °dH entspricht einer Massenkonzentration an Calciumoxid (CaO) in Wasser von 10 mg/l.

CaO hat die molare Masse von 56 g/mol. Da CaO 2-wertig ist, hat es die äquimolare Masse von  $56/2 = 28 \text{ g/mol}$ . Das bedeutet: Eine 1-milliäquivalente Lösung weist eine Massenkonzentration an Calciumoxid von 28 mg/l auf.

Damit ist die Umrechnungsmöglichkeit der Äquivalentkonzentration in °dH und umgekehrt gegeben:

$$^{\circ}\text{dH}/2,8 = c(^{1/2}\text{CaO})$$

$$c(^{1/2}\text{CaO}) \cdot 2,8 = ^{\circ}\text{dH}$$

Mittels der vorgenannten Definitionen können alle Konzentrationsangaben im Bereich der Wasserchemie auf °dH umgerechnet werden (s. Tabelle 3.3). Dividiert man die Massenkonzentration durch die äquimolare Masse des betreffenden Ions und multipliziert mit 2,8, dann ist das Ergebnis die Konzentrationsangabe des betreffenden Ions in °dH.

Tabelle 3.3 Umrechnung von °dH in Massenkonzentration, Stoffmengenkonzentration und Equivalentkonzentration

Ion bzw. Molekül	deutsche Härtegrade in °dH	Massenkonzentration $\rho(X)$ in mg/l	Stoffmengenkonzentration $c(X)$ in mmol/l	Equivalentkonzentration $c(1/z X)$ in mmol/l
Ca <sup>2+</sup>	1	7,14	0,18	0,36
Mg <sup>2+</sup>	1	4,36	0,18	0,36
Na <sup>+</sup>	1	8,21	0,36	0,36
K <sup>+</sup>	1	13,93	0,36	0,36
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	1	6,43	0,36	0,36
Fe <sup>2+</sup>	1	9,97	0,18	0,36
Mn <sup>2+</sup>	1	9,81	0,18	0,36
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	1	10,71	0,18	0,36
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1	21,79	0,36	0,36
Cl <sup>-</sup>	1	12,68	0,36	0,36
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1	17,14	0,18	0,36
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1	22,14	0,36	0,36
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	1	11,32	0,12	0,36
CaO	1	10,00	0,18	0,36
CO <sub>2</sub>	1	7,86	0,18	0,36
SiO <sub>2</sub>	1	10,71	0,18	0,36

**Beispiel: 1**

$$\rho(\text{SO}_4^{2-}) = 10 \text{ mg/l}$$

$$1/2 \text{ M}(\text{SO}_4^{2-}) = 48 \text{ mg/mmol}$$

$$(10/48) \cdot 2,8 = 0,58 \text{ °dH}$$

Die Massenkonzentration an Sulfationen von 10 mg/l entspricht somit 0,58 °dH.

Eine Einteilung von Wasser nach Härtegraden gibt Tabelle 3.4 wieder, eine Einteilung nach dem «Waschmittelgesetz» Tabelle 3.5.

**Beispiel: 2**

Ein Rohwasser weist eine Gesamthärte von 7 °dH auf.

Wie groß sind die Massen-, Stoffmengen- und Äquivalentkonzentrationen? (Multiplikatoren s. Tabelle 3.3)

$$\rho(\text{CaO}) = 7 \cdot 10 = 70 \text{ mg/l}$$

$$c(\text{CaO}) = 7 \cdot 0,18 = 1,26 \text{ mmol/l}$$

$$c(1/2 \text{ CaO}) = 7 \cdot 0,36 = 2,56 \text{ mmol/l}$$

Die gebundene Kohlensäure ( $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) ist entweder als Calciumkarbonat (Kalk) und/oder Magnesiumkarbonat (Magnesia) gebunden.

Die freie Kohlensäure ( $\text{CO}_2$ ) ist überwiegend gasförmig in Wasser gelöst. Ein Teil davon bewirkt, dass die Hydrogenkarbonate in Lösung gehalten werden. Die zugehörige freie Kohlensäure wirkt nicht aggressiv. Der Anteil an freier Kohlensäure, der im Wasser über der Konzentration der zugehörigen freien Kohlensäure enthalten ist, wird als überschüssige oder (in Bezug auf Kalk) als aggressive Kohlensäure bezeichnet.

Ein Wasser, dessen Konzentration an freier Kohlensäure gleich der zugehörigen freien Kohlensäure ist, d. h. gerade soviel zugehörige freie Kohlensäure enthält wie erforderlich ist, um das vorhandene Calciumhydrogenkarbonat in Lösung zu halten, befindet sich im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht. Es ist weder kalkaggressiv noch fällt Kalk aus.

**3.1.4 Kohlensäure**

Jedes in der Natur vorkommende Wasser hat einen Gehalt an Kohlensäure, die frei und in Form von Anionen vorliegt.

**3.1.5 Säure- und Basekapazität**

**Säurekapazität eines Wassers**

Die Säurekapazität des Wassers (KS) ist der Quotient aus der Stoffmenge an Hydronium-

Tabelle 3.4 Allgemein übliche Einteilung der Wässer nach Härtegraden

Härte ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ ) in mmol/l	Gesamthärte in der alten Einheit °dH	Beurteilung
...0,7	...4	sehr weich
0,7...1,4	4...8	weich
1,4...2,1	8...12	mittelhart
2,1...3,2	12...18	ziemlich hart
3,2...5,4	18...30	hart
über 5,4	über 30	sehr hart

Tabelle 3.5 Einteilung der Wässer in Härtegrade nach dem «Waschmittelgesetz»

Härtebereich	Härte in mmol/l	Gesamthärte in °dH
1 (weich)	...1,3	...7
2 (mittelhart)	1,3...2,5	7...14
3 (hart)	2,5...3,8	14...21
4 (sehr hart)	über 3,8	über 21

ionen, die eine bestimmte Stoffportion Wasser bis zum Erreichen bestimmter pH-Werte aufnehmen kann und dem Volumen dieser Stoffportion:

$$K_S = n(\text{H}_3\text{O}^+)/V(\text{H}_2\text{O}) \text{ mol/m}^3 \text{ oder mmol/l}$$

Der Wert der Säurekapazität ist geringfügig von der Temperatur und der Ionenstärke des Wassers abhängig.

Als Säurekapazität bis zum pH-Wert 8,2 ( $K_{S,8,2}$ ) bezeichnet man, wenn das Wasser durch Zugabe von Hydroniumionen, in der Regel Salzsäure mit einem bekannten Gehalt (z. B.  $c(\text{HCl}) = 0,1 \text{ mol/l}$ ), den pH-Wert 8,2 erreicht hat.

Dieser pH-Wert leitet sich aus dem System Kohlensäure-Wasser ab. Der pH-Wert 8,2 hat eine wässrige Hydrogenkarbonatlösung mit mehr als 1 mmol/l  $\text{HCO}_3^-$ -Ionen, einer Temperatur von 25°C und einer Ionenstärke von 10 mmol/l.

Als Säurekapazität bis zum pH-Wert 4,3 ( $K_{S,4,3}$ ) bezeichnet man die Säurekapazität des Wassers, wenn dieses durch Zugabe von Salzsäure den pH-Wert 4,3 erreicht hat.

### Basekapazität eines Wassers

Die Basekapazität des Wassers ( $K_B$ ) ist der Quotient aus der Stoffmenge an Hydroxidionen, die eine bestimmte Stoffportion Wasser bis zum Erreichen bestimmter pH-Werte aufnehmen kann und dem Volumen dieser Stoffportion:

$$K_B = n(\text{OH}^-)/V(\text{H}_2\text{O}) \text{ mol/m}^3 \text{ oder mmol/l}$$

Als Basekapazität bis zum pH-Wert 8,2 ( $K_{B,8,2}$ ) bezeichnet man die Basekapazität des Wassers, wenn dieses durch Zugabe von Hydroxidionen, i. d. R. Natronlauge, mit einem bekannten Gehalt (z. B.  $c(\text{NaOH}) = 0,1 \text{ mol/l}$ ) den pH-Wert 8,2 erreicht hat.

Als Basekapazität bis zum pH-Wert 4,3 ( $K_{B,4,3}$ ) bezeichnet man die Basekapazität des Wassers, wenn es durch Zugabe von Natronlauge den pH-Wert 4,3 erreicht hat.

Diese pH-Werte leiten sich ebenfalls, wie unter dem Begriff Säurekapazität beschrieben, aus dem System Kohlensäure-Wasser ab.

### 3.1.6 Elektrische Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit des Wassers gibt einen Anhalt für die Konzentration der in einem Wasser vorhandenen Salze bzw. der dissoziierbaren Stoffe.

- Die Leitfähigkeit wird ausgedrückt in Siemens pro Meter (S/m).
- Gebräuchliche Einheiten sind: mS/m (=  $10^{-3}$  S/m) und vor allem  $\mu\text{S/cm}$  (=  $10^{-4}$  S/m).
- Absolut reines Wasser weist bei 18°C eine Leitfähigkeit auf von 0,044  $\mu\text{S/cm}$ .
- Betriebswässer haben üblicherweise elektrische Leitfähigkeiten bis 1000  $\mu\text{S/cm}$ .
- Durch Vollentsalzung wird die Leitfähigkeit <0,2  $\mu\text{S/cm}$  erreicht.
- Die Aussagemöglichkeiten der elektrischen Leitfähigkeitsmessung haben eine besondere Bedeutung für die Beurteilung und Überwachung des Reinheitsgrades von Kesselspeisewasser, Dampfturbinenkondensat, Reinstwasser usw.

### 3.1.7 Wasseranalyse

Zur Beurteilung der Wasserqualität und des Korrosionsverhaltens metallischer Werkstoffe werden die in Tabelle 3.6 aufgeführten Analysenwerte des jeweiligen Wassers benötigt (Analysenwerte von hochreinem Wasser s. Tabelle 3.7).

Von Bedeutung für eine Korrosionsbeurteilung sind auch Art und Konzentration der im Wasser gelösten natürlichen Inhibitoren, die die Ausbildung von Schutzschichten fördern. Dazu zählen Phosphate, Silikate und Aluminiumverbindungen.

Bei der Beurteilung von Schadensfällen kann die Konzentration von nach der Wasserentnahmestelle aufgenommenen Stoffen, die nicht im Protokoll der Wasseranalyse aufgeführt sind, z. B. Kupferionen oder andere Korrosionsprodukte von Anlagenbauteilen, interessant sein. Es ist dann eine zusätzliche Wasserprobe in der Nähe der Schadensstelle innerhalb der Anlage zu entnehmen.

Tabelle 3.6 Umfang einer Wasseranalyse (in Anlehnung an DIN 50930)

Bezeichnung der Probe: . . . . .	
Ort der Probenahme: . . . . .	
Datum der Probenahme: . . . . .	
Parameter	Einheit
Wassertemperatur	°C
pH-Wert	–
elektrische Leitfähigkeit	mS/m
Säurekapazität bis pH = 4,3	mol/m <sup>3</sup>
Basekapazität bis pH = 8,2	mol/m <sup>3</sup>
Summe Erdalkalien	mol/m <sup>3</sup>
Calcium-Ionen	mol/m <sup>3</sup>
Magnesium-Ionen	mol/m <sup>3</sup>
Chlorid-Ionen	mol/m <sup>3</sup>
Nitrat-Ionen	mol/m <sup>3</sup>
Sulfat-Ionen	mol/m <sup>3</sup>
Eisen, gesamt	mol/m <sup>3</sup>
Eisen filtriert	mol/m <sup>3</sup>
Mangan, gesamt	mol/m <sup>3</sup>
Sauerstoff	g/m <sup>3</sup>
Oxidierbarkeit Mn VII zu II (als O <sub>2</sub> )	g/m <sup>3</sup>

innerhalb sehr weiten Grenzen (wenige mg/l... 250 mg/l).

Liegt die Konzentration an Chloridionen über 150 mg/l, besteht Lochfraßgefahr. Je weicher und karbonatärmer ein Wasser ist, umso mehr macht sich der metallangreifende Einfluss der Chloride bemerkbar.

**Sulfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)**

Normale Wässer enthalten meistens 10...30 mg/l Sulfationen. Wässer mit einem Gehalt an Sulfaten von über 250 mg/l wirken auf Eisenwerkstoffe korrosiv. Gusseisen grafitiert und Stahl neigt zu Lochfraß. Sulfatreiche Wässer sind auch für Beton schädlich. Die Betonzerstörung beginnt bei 150...200 mg/l (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>).

**Nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)**

Nitrationen kommen in Grundwässern und Oberflächenwässern in unterschiedlichen Konzentrationen vor. Normale Werte liegen bei ca. 10 mg/l (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Konzentrationen über 20 mg/l greifen bei weichen Wässern Eisenwerkstoffe an, auch wenn das Wasser rost-schutzbildende Kohlensäure enthält.

**3.1.7.1 Beurteilung einzelner Analysenwerte**

**Chlorid (Cl<sup>-</sup>)**

Chloridionen sind in fast allen natürlichen Wässern, auch in Regenwasser und in vielen Abwässern, enthalten. Ihre Konzentration be-  
wegt sich, je nach den örtlichen Verhältnissen,

**Nitrit (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)**

Nitrit ist in reinem Wasser fast nie enthalten. Verschmutzte Wässer enthalten 0,1...2 mg/l, Moorwasser 0,1...1 mg/l. Das Auftreten von Nitrit zeigt in den meisten Fällen eine fäkale Verunreinigung an.

Tabelle 3.7 Hochreines Wasser

	Leitfähigkeit µS/cm	Salzgehalt mg/kg	Gase mg/kg	
			O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
einfach destilliertes Wasser	2	<20		
dreifach destilliertes Wasser	0,5...1	1...2		
vollentsalztes Wasser VE-Wasser	0,5	0,2...0,5	0,01...0,03	0,5...1,0
enthionisiertes Wasser Deionat	0,1...1,0	<0,1 (Chloride)		

### Ammonium-Stickstoff (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N)

Ammonium-Stickstoff ist in vielen oberirdischen Gewässern, in einigen Grundwässern sowie in allen häuslichen und oft auch in gewerblichen Abwässern enthalten. Die Form, in der Ammonium-Stickstoff vorkommt, ob als NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Ion oder als NH<sub>4</sub>OH bzw. NH<sub>3</sub><sup>+</sup>, hängt vom pH-Wert des Wassers ab. Eisenwerkstoffe werden ab einem Gehalt von mehr als 20 mg/l angegriffen. Kupfer und Kupferlegierungen korrodieren und sollen bei Anwesenheit von Ammoniumsalzen und Ammoniak nicht verwendet werden.

### Eisen (Fe)

Eisen kann in Wasser in Form von Eisen(II)- und Eisen(III)-Ionen, in ungelösten Verbindungen oder kolloidal gelöst sowie in organischer Bindung vorliegen. Außerdem kann Eisen in sog. Komplexen vorkommen, vor allem in Abwässern. Eisen kann bestimmt werden als:

- Gesamteisen, d. h. die Summe der gelösten und ungelösten Eisen,
- Gesamtes gelöstes Eisen, d. h. die Summe von Eisen(II)- und Eisen(III)-Verbindungen.

Eisen ist korrosionschemisch unbedenklich. Bei einem Gehalt von über 0,2 mg/l fällt, steigend mit zunehmendem Fe- und O<sub>2</sub>-Gehalt, Ockerschlämme aus, der sich in Rohrleitungen bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten absetzt.

### Mangan (Mn<sup>2+</sup>)

Mangan ist korrosionschemisch unbedenklich. Bei höherem Gehalt als 0,1 mg/l kommt es wie bei Eisen zu Ablagerungen.

#### Oxidierbarkeit Mn (VII) zu Mn (II)

Die Oxidierbarkeit ist ein Maß für die biologische Verunreinigung eines Wassers. Sie wird ausgedrückt in g/m<sup>3</sup> O<sub>2</sub>. Vorkommende Werte:

- reines Grundwasser 0,7 ... 2 g/m<sup>3</sup>
- reines Oberflächenwasser 2,5 ... 7,5 g/m<sup>3</sup>
- verschmutztes Wasser 5 ... 38 g/m<sup>3</sup>
- stark verschmutztes Wasser (Moorwasser) > 75 g/m<sup>3</sup>

Korrosionsgefahr durch organische Stoffe besteht erst, wenn z. B. Ablagerungen entstehen (Gefahr von Lochfraß) oder dass sich aus Eiweißverbindungen Schwefelwasserstoff bildet.

In Moorwässern besteht jedoch eine Korrosionsgefahr durch Huminsäuren, die stark eisenaggressiv sind.

## 3.2 Aufbereitungssysteme

Um den Anteil der Stoffe im Wasser zu reduzieren, die zu Ablagerungen, Korrosion und Gasentwicklung führen, werden im Anlagenbau folgende Systeme angewendet:

- Die **festen Bestandteile** werden durch Feinfilter (Maschenweite ca. 10 µm) entfernt.
- Die **gelösten Bestandteile** können durch die Ionen-Bindungskräfte in sog. Ionenaustauschern abgeschieden werden (im Anlagenbau am meisten angewendet). Eine andere Möglichkeit ist das «Abfiltern» in sog. Osmose-Anlagen, wobei hier durch die Maschenweite der Osmosefläche, einzelne Molekülgruppen nur durchströmen können.
- Eine 3. Möglichkeit ist das **Verdampfen** von Wasser mit anschließender Kondensation. Hierbei ist jedoch der Energieaufwand zu beachten (z. B. Meerwasserentsalzung).

Für **kleine Anlagen** ohne geregelte Wasseraufbereitung wird das zum Füllen und Ergänzen der Anlage notwendige Wasser dem Trinkwassernetz entnommen.

Zur Vermeidung eventuell möglicher Schäden durch Kalkablagerungen und Sauerstoffkorrosion wird empfohlen, unter fachlicher Beratung, die Anlage bei der ersten Füllung durch Zugabe entsprechender Inhibitoren zu schützen und später gelegentlich zu kontrollieren, ob der Korrosionsschutz noch wirksam ist.

Für **größere Anlagen** ist zur Verhütung einer Kesselsteinbildung mindestens eine Enthärtung des Füll- und Zusatzwassers erforderlich. Dies hat jedoch zur Folge, dass sich auf der Oberfläche von Eisenwerkstoffen

keine Schutzschicht bilden kann und das Wasser aggressiv wird, wenn freier Sauerstoff und freie Kohlensäure vorhanden sind. Vor allem Sauerstoff führt zu schwerwiegenden Korrosionsschäden (Lochfraß).

Eine Entgasung oder eine chemische Sauerstoffbindung zum Korrosionsschutz ist deshalb notwendig, wenn das System wirtschaftlich betrieben werden soll.

### Enthärtung

Eine Enthärtung kann durch verschiedene, dem Bedarfsfall angepasste Verfahren erfolgen:

- Entkarbonisierung,
- Fällungsenthärtung mit Chemikalien,
- Enthärtungsaustausch.

Die Fällungsenthärtung mit einer Zugabe von Kalk, Soda, Natronlauge oder Trinatriumphosphat bedingt ein Abschlämmen der ausgefällten Härtebildner.

### Entsälzung

Eine Entsälzung kann erfolgen als:

- Teilentsälzung, ein Entkarbonisierungs- und Enthärtungsverfahren,
- Vollentsälzung, mit Entfernung sämtlicher im Wasser enthaltenen Ionen. Die Bezeichnung dieser Wässer ist **VE-Wasser** und Deionat.

### Entgasung

Da die Gaslöslichkeit in Wasser von der Temperatur abhängig ist, besteht die Möglichkeit, durch Temperierung des Wassers, die Gasmenge im Wasser zu reduzieren. Eine weitere Möglichkeit ist die chemische Entgasung.

#### 3.2.1 Ionenaustauscher

Zur Vermeidung von Steinbildung werden dem Wasser üblicherweise Calcium- und Magnesiumionen durch die Behandlung in einem Ionenaustauscher entzogen. Die Kunststoffkugeln der Austauschermasse sind mit Natriumionen beladen, die gegen die Calcium- und Magnesiumionen des zu behandelnden Wassers ausgetauscht werden.

Wenn die Austauschkapazität erschöpft ist, findet eine Regenerierung mit Natriumchloridlösung statt, wobei die dann in höherer Konzentration vorliegenden Natriumionen durch die an das Harz gebundene Calcium- und Magnesiumionen ausgetauscht werden.

Diese Anlagen werden üblicherweise als Doppelanlagen installiert, wobei nach Erschöpfung der 1. Anlage automatisch auf die 2. Anlage umgeschaltet wird, während dann die 1. Anlage in dieser Zeit regeneriert wird (Bild 3.2).

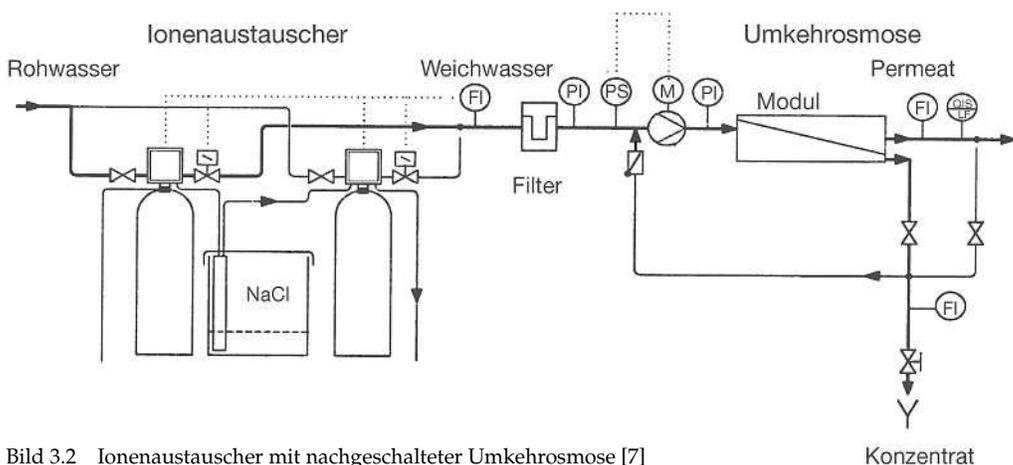


Bild 3.2 Ionenaustauscher mit nachgeschalteter Umkehrosmose [7]

### 3.2.2 Umkehrosmose

Rohwasser, das frei von ungelösten Stoffen und möglichst enthärtet sein sollte, fließt zunächst über ein Feinfilter zur Druckerhöhungspumpe. Das Wasser wird dann durch eine halbdurchlässige Membrane gedrückt, wobei hier die Salzteilchen nicht die Membrane durchwandern können und sich konzentrieren (Konzentrat).

Die Anlagen arbeiten meist bei einem Betriebsüberdruck von ca. 12...16 bar. Der Restsalzgehalt im Reinwasser, dem Permeat, liegt zwischen 2...5% vom Ausgangswert. Üblicherweise wird die Umkehrosmoseanlage mit einem Recovery von 75% betrieben, d. h., aus 100 l/h Rohwasserteilen bilden sich 75 l/h salzarmes Permeat und 25% salzhaltiges Konzentrat. Der Salzgehalt im Konzentrat ist ca. 4fach höher als im Rohwassereingang.

Über ein Leitwertmessgerät wird die Permeatqualität überwacht. Falls erforderlich, werden Erstpermeatableitung, Zwangspülmaßnahmen usw. ausgelöst. Im Gegensatz

zum Ionenaustauschverfahren werden keine Regenerierchemikalien eingesetzt. Aus diesem Grunde zählt auch die Umkehrosmose mit zu den umweltfreundlichen Aufbereitungsverfahren.

Weil eine Regeneration, wie bei Ionenaustauschern notwendig, entfällt, kann die Umkehrosmose kontinuierlich betrieben werden. Der Bedienungs- und Wartungsaufwand ist sehr gering. Allerdings sollten größere Stillstandszeiten vermieden werden.

### 3.2.3 Entgasung

Das zu entgasende Wasser wird üblicherweise über Rieselleche (damit größere Wasseroberfläche) geleitet. Durch Aufheizen des Wassers (bei atmosphärischen Anlagen) auf etwas über 100°C (ca. 102°C), werden die Gase fast vollständig aus dem Wasser ausgegast (Bild 3.3).

Es besteht auch die Möglichkeit bei niedrigeren Temperaturen zu entgasen, jedoch muss dann die Anlage unter Vakuum betrieben werden.

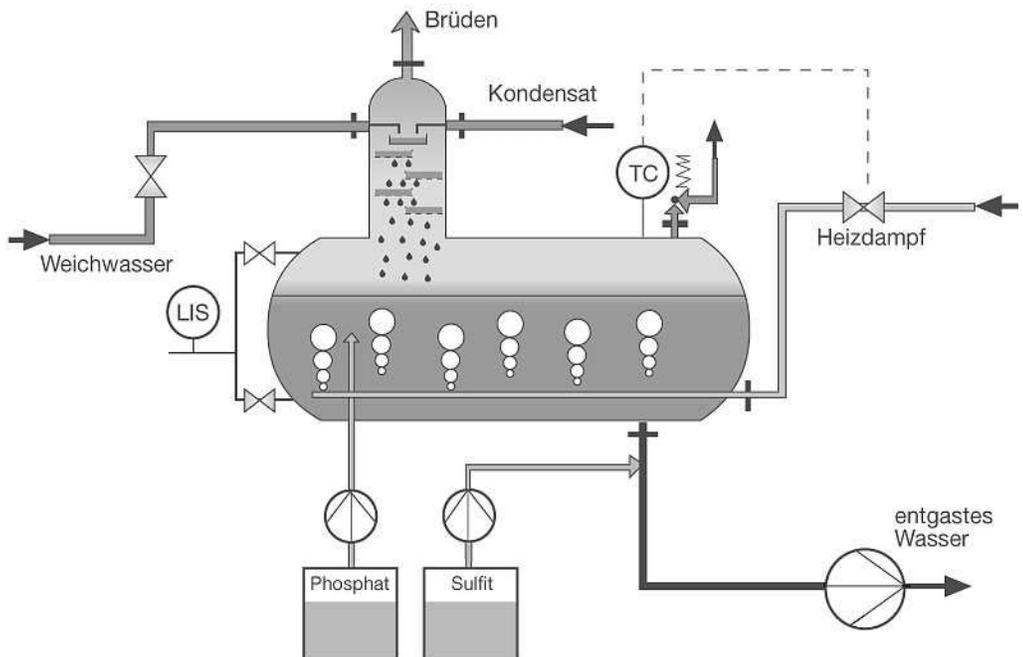


Bild 3.3 Thermische Entgasung

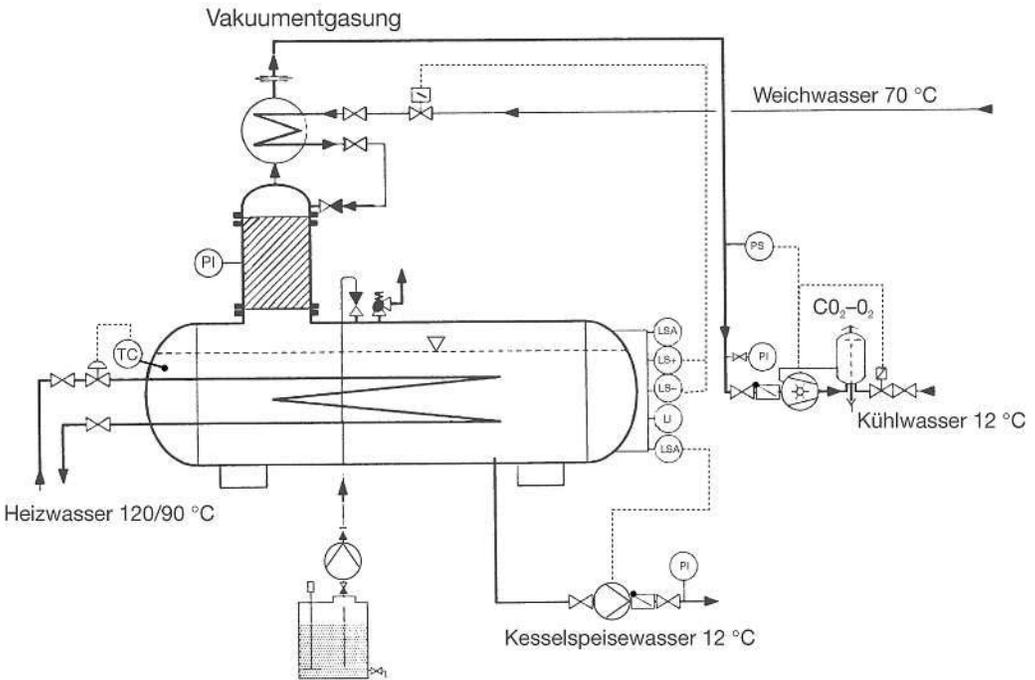
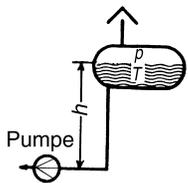


Bild 3.4 Vakuumentgasungsanlage



p	Druck im Sammelgefäß	ata	1				Sattdampfdruck
			bis 70	80	90	100	Siedetemperatur
T	max. Wassertemperatur	°C					
h	Mindestzulaufhöhe (geodätische Höhe)	m	0	0...2	1...3	3...6	3...6 je nach Pumpe und Betriebsdaten

Bild 3.5 Mindestzulaufhöhe zur Speisepumpe vom Entgaser (Anhaltswerte)

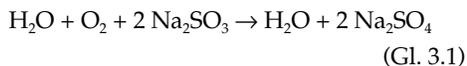
Bei einem Rieselentgaser, Betriebsdruck 0,3 bar, kann ein Restsauerstoffgehalt von 0,1 mg/l, bei einer Kombination mit einem Nachtentgaser bzw. Aufkochvorrichtung von 0,02 mg/l sowie ein Restkohlendioxidgehalt ( $\text{CO}_2$ ) von <1 mg/l erreicht werden (Bild 3.4).

Um Kavitation in den Absaugpumpen (siehe NPSH-Wert der Pumpe) des Entgasers zu verhindern, werden die Entgasungsanlagen ca. 3,5 m oberhalb der Pumpen aufgestellt (Bild 3.5).

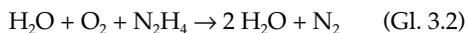
### Chemische Bindung von Sauerstoff

Durch eine zusätzliche Dosierung von Restsauerstoffbindemittel, wie Natriumsulfit, Hydrazin und Alkalisierungsmittel, Ammoniak oder Trinatriumphosphat, kann das Wasser allen Anforderungen entsprechend nachbehandelt werden.

Die Reaktion mit **Natriumsulfit** ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) lautet:



Kommt **Hydrazin** ( $\text{N}_2\text{H}_4$ ) zum Einsatz, erfolgt die Reaktion gemäß:



Bei Natriumsulfit erfolgt die Bindung des Sauerstoffs unter Bildung von Natriumsulfat, d. h., der Salzgehalt des Wassers wird erhöht. Bei Einsatz von Hydrazin wird der Sauerstoff ohne Salzanreicherung unter Bildung von flüchtigem Stickstoff gebunden. Ein Überschuss von Natriumsulfit ist nicht dampfflüchtig.

Bei Hydrazin wird der Überschuss in Stickstoff und Ammoniak aufgespalten, wodurch auch ein Schutz des Dampf- und Kondensat-systems erreichbar ist.

Zur Sauerstoffbindung von 1 g werden ca. 15 g Natriumsulfit oder 6 g Hydrazin benötigt.

Hydrazin kann unter normalen Bedingungen beliebig mit Wasser vermischt bzw. verdünnt werden.

Konzentrierte Lösungen sind stark alkalische Flüssigkeiten mit pH-Werten von 12...13. Beim Umgang mit Hydrazin sind daher die bei stark basischen Stoffen üblichen Sicherheitsmaßnahmen unbedingt zu beachten.

In Lebensmittelbetrieben darf Hydrazin nur verwendet werden, wenn durch entsprechende Maßnahmen Vorsorge getroffen ist, dass ein Überschuss den zulässigen Grenzwert mit Sicherheit nicht überschreitet, und Arbeitsschutzmaßnahmen getroffen sind.

### 3.2.4 Absalzung

Beim Verdampfen von Wasser erhöht sich der Salzgehalt des Kesselwassers. Das Gleiche gilt auch für den Verdunstungsvorgang bei Kühlturmanlagen.

Der Salzgehalt ist durch periodisches oder kontinuierliches Ablassen einer bestimmten Kesselwassermenge und durch Nachspeisen von Speisewasser mit sehr viel kleinerem Salzgehalt auf einen ungefährlichen Wert zu begrenzen.

Die erforderliche Entsalzungsmenge beträgt:

$$E_D = (1 - K) \cdot \frac{100 \cdot L_S}{L_K - L_S} \quad (\text{Gl. 3.3})$$

$$E_W = \frac{100 \cdot E_D}{100 + E_D} \quad (\text{Gl. 3.4})$$

mit:

$E_D$  Entsalzungsmenge in % der Dampfleistung des Dampferzeugers

$E_W$  Entsalzungsmenge in % der Speisewassermenge

$K$  Verhältnis der zurückkommenden Kondensatmenge zur erzeugten Dampfmenge

$L_S$  Leitfähigkeit des Speisewassers

$L_K$  Leitfähigkeit des Kesselwassers

## 3.3 Grenzwerte für die Wasserbeschaffenheit

Damit keine Probleme bei der Anwendung von Wasser und Wasserdampf entstehen, wurden Richtwerte für die einzelnen Anwendungen festgelegt.

### 3.3.1 Kühlwasser

Kühlwasser darf keine Ablagerungen und Ausscheidungen auf den Kühlflächen verursachen und die Kühlflächen nicht korrodieren. Es sollten daher folgende Grenzwerte eingehalten werden:

Summe Erdalkalien	0,7...1,4	mmol/l
Eisen	< 0,3	mg/l
Oxidierbarkeit	< 6	g/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>

Tabelle 3.8  
Empfohlene Grenzwerte für die Beschaffenheit von Kühlwasser bei Wandtemperaturen unter 60°C

		C-Stahl und Buntmetalle	C-Stahl beschichtet	Kunststoffe Cr-Ni-Mo-Stahl
Aussehen		klar und ohne Bodensatz	klar und ohne Bodensatz	klar und ohne Bodensatz
pH-Wert		7,5...8,5	7,5...8,5	7,5...8,5
Gesamtsalzgehalt	ppm	< 1800	< 2100	< 2500
elektrische Leitfähigkeit	µS/cm	< 2200	< 2200	< 2200 < 3000
Calcium (Mindestwert) ohne Dosierung	Ca °dH	> 20 ppm < 2,8 °dH	> 20 ppm < 2,8 °dH	–
m-Wert ohne Härtestabilisatoren	HCO <sub>3</sub>	< 1,4 mval/l	< 1,4 mval/l	< 1,4 mval/l
m-Wert bei Einsatz von Härtestabilisatoren aus der Produktreihe	HCO <sub>3</sub>	< 7 mval/l	< 7 mval/l	< 7 mval/l
Chlorid	Cl	< 200 ppm	< 200	< 200
Sulfat	SO <sub>4</sub>	< 300 ppm	< 400	< 400
Eisen	Fe	< 0,1 ppm	< 0,1 ppm	< 0,1 ppm
Mangan	Mn	< 0,1 ppm	< 0,1 ppm	< 0,1 ppm
Kupfer	Cu	< 0,5 ppm	< 0,5 ppm	< 0,5 ppm
KMnO <sub>4</sub> -Verbrauch	mg/l	< 100	< 100	< 100
Keimzahl	K/l	< 10000	< 10000	< 10000

Dabei wird für jeden Bestandteil die spezifische Absalzung ermittelt.

Salzgehalt  
(bei Kühlturbetrieb) max. 3000 mg/l  
Chloridgehalt max. 600 mg Cl<sup>-</sup>/l  
Sulfatgehalt max. 400 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/l.

Bei austenitischen Werkstoffen im Kühlsystem muss wegen der Lochfraßgefahr der maximale Chloridgehalt weiter abgesenkt werden (Tabelle 3.8).

Eine gefährliche Art von Ablagerungen wird durch Mikroorganismen, wie Bakterien, Algen und Pilze verursacht.

Eine Bekämpfung dieser Organismen kann durch eine Chlorzugabe zum Kühlwasser erfolgen. Die Dauerbelastung durch Chlorierung sollte aus Korrosionsgründen einen Wert

von 2 mg freies Cl<sub>2</sub>/l nicht übersteigen. Eine Stoßbelastung durch höhere Chlorzugaben ist nur für kurze Zeiten zulässig. Aus Gründen des Umweltschutzes sollte man jedoch anstelle von Chlor Bakterizide und Biozide einsetzen.

- Bakterizide sind Wirkstoffe, die in geeigneter Konzentration durch Hemmung von Wachstum und Teilung Bakterien abtöten.
- Biozide sind Umweltchemikalien, die Organismen abtöten. Die Wirkung von Bioziden auf die Mikroorganismen liegt in ihrer Enzymtätigkeit.

Infolge einer sehr guten Anpassungsfähigkeit des mikrobiologischen Lebens an die Umwelt ist eine effektive Kontrolle des gesamten

Kühlsystems erforderlich, damit sichergestellt ist, dass die biologische Aktivität der schädlichen Organismen geschwächt bzw. abgebaut wird.

Bakterizide und Biozide haben im Gegensatz zu Chlor keine korrosive Wirkung auf die in Kühlwasserkreisläufen eingesetzten Werkstoffe.

Wird Flusswasser, Brackwasser oder Meerwasser als Kühlmittel verwendet, muss mit einem Feststoffgehalt in Form von Sand gerechnet werden.

### Offene Kühlkreisläufe

Bei offenen Kühlturmanlagen ist zu beachten, dass durch die Verdunstung von Wasser eine Konzentration (Eindickung) der festen Stoffe sowie der hochmolekularen Wasserbeimengungen erfolgt.

Um die Qualität des Umlaufwassers zu garantieren, ist somit ständig Wasser mit einer Qualität des entweichenden Dampfes nachzuspeisen (voll entsalztes Wasser, VE-Wasser). Die Zusatzwassermenge addiert sich aus dem Verdunstungsverlust, dem Spritzverlust (ca. 0,1 ... 0,3 % der Umlaufmenge) und der Absalzmenge. Die Absalzmenge ist abhängig von der zulässigen Eindickung.

### Geschlossene Kühlkreisläufe

Geschlossene Kühlsysteme haben keinen Kühlturm, die Kühlung erfolgt durch Wärmeaustauscher usw. Das Kühlwasser wird nicht eingedickt. Die Zusatzwassermengen sind sehr gering. Das Wasser ist sehr lange im System, es wird praktisch nicht erneuert. Bei diesen Systemen ist hauptsächlich Korrosion zu verhindern (Sauerstoffkorrosion).

### Warm- und Heißwasseranlagen

Richtwerte für die Wasserbeschaffenheit gibt Tabelle 3.9 wieder.

#### 3.3.2 Wasser für Kesselanlagen

Für alle Wässer im Wasser-Dampf-Kreislauf von Wärmekraftanlagen, insbesondere für das Kesselspeisewasser, gelten für die Beschaffenheit Richtlinien des VGB und des TÜV, die in besonderen Regelwerken veröffentlicht sind (Tabelle 3.10).

□ **VdTÜV-Richtlinien** für Kesselspeisewasser und Kesselwasser gelten für Dampfzeuger **bis 68 bar** zulässigen Betriebsüberdruck.

Tabelle 3.9  
Richtwerte für Nieder- und Hochdruck-Warmwassererzeuger für Kesseltemperaturen über 100 °C

Fahrweise		salzarm		salzhaltig
Richtwerte für Kessel und Kreislaufwasser				
allgemeine Anforderungen		klar ohne Sedimente		
elektrische Leitfähigkeit	µS/cm	0 ... 30	30 ... 100	100 ... 1500
pH-Wert bei 25 °C	pH	9 ... 10	9 ... 10,5	9 ... 10,5
Sauerstoff (O <sub>2</sub> )	mg/l	< 0,1	< 0,05	< 0,02
gebundene Kohlensäure	mg/l	< 25	< 25	< 50
Erdalkalien (Ca + Mg)	mmol/l	< 0,02	< 0,02	< 0,02
	°dH	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Phosphatgehalt (PO <sub>4</sub> )	mg/l	1 ... 5	1 ... 10	1 ... 15
Hydrazin (N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	mg/l	0,3 ... 3	0,3 ... 3	0,3 ... 3
Natriumsulfid	mg/l	–	–	< 10

Tabelle 3.10 Anforderungen an das Kesselwasser von Flammrohrkesseln und Schnelldampferzeuger

Druckstufe		<1 bar	1 ... 22 bar	22 ... 44 bar	<36 bar	<44 bar	<44 bar
Betriebsweise		salzhaltiges Speisewasser > 50 µS/cm				salzarm	salzfrei
Kesselbauart		Flammrohr-Rauchrohrkessel			Schnelldampf-Erzeuger	Flammrohr-Rauchrohrkessel	
allgemeine Anforderungen		farblos, klar, frei von ungelösten Stoffen und Schaumbildnern					
pH-Wert bei 25°C	pH	>9	<9	<9	9–9,5	<9	<9
Säurekapazität bis pH 8,2 (p-Wert)	mval/l	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1	>0,1	–
Erdalkalien (Gesamthärte)	mmol/l °dH	<0,015 <0,1	<0,015 <0,1	<0,01 <0,05	<0,01 <0,05	<0,01 <0,05	<0,0051 <0,03
Sauerstoff O <sub>2</sub>	mg/l	<0,1	<0,02	<0,02	<0,1	<0,02	<0,1
Leitfähigkeit (LF) bei 25°C Direktmessung	µS/cm	–	–	<500	<5000	5 ... 50	<5
gebundene Kohlensäure	mg/l	<25	<25	<25	<50	<10	<1
Eisen, gesamt Fe	mg/l	–	<0,05	<0,03	–	<0,03	<0,03
Kupfer, gesamt Cu	mg/l	–	<0,01	<0,05	–	<0,005	<0,005
Öl, Fett	mg/l	<3	<1	<1	<1	<1	<1
Kieselsäure SiO <sub>2</sub>	mg/l	nur Grenzwerte				<2	<0,05
Phosphat PO <sub>4</sub>	mg/l	10 ... 20	10 ... 20	5 ... 15	5 ... 10	10 ... 30	5 ... 10
KMnO <sub>4</sub> -Verbrauch	mg/l	<100	<150	<100	–	<50	<30
Hydrazin N <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	mg/l	0,2 ... 0,5	0,2 ... 0,5	0,2 ... 0,5	–	0,2 ... 0,5	0,2 ... 0,5

□ **VGB-Richtlinien** gelten für Wasserrohrkessel ab **64 bar** Betriebsüberdruck.

Beim Betrieb von Dampfkesselanlagen unterscheidet man verschiedene wasserchemische Fahrweisen.

#### Alkalische Fahrweise

Bei Umlaufkesseln bis 68 bar zulässigem Betriebsüberdruck herrscht die alkalische Fahrweise mit sauerstofffreiem Speisewasser vor,

da nur diese Fahrweise es gestattet, Dampferzeuger mit salzhaltigem Wasser zu betreiben. Korrosion ist unter diesen Bedingungen nur zu vermeiden, wenn eine ausreichende alkalische Reaktion vorliegt. In den meisten Fällen ist eine Alkalisierung mit festen Alkalisierungsmitteln erforderlich. Flüchtige Alkalisierungsmittel reichen hierzu allein nicht aus.

Salzfreies Speisewasser für Umlaufkessel kann allein mit flüchtigen Alkalisierungsmitteln konditioniert werden, wenn die Leitfähig-