

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

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). Dem Vogel Buchverlag danke ich für die gewohnt hervorragende Zusammenarbeit.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Rohwasser	9
2 Anwendungsgrenzen von Rohwasser	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
3 Wasseraufbereitung	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
4 Stoffwerte von Wasser und Wasserdampf	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
5 Strömung und Wärmeübertragung	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
6	Wasseranlagen	65
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
7	Wasserdampfanlagen	81
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
8	Kondensatsystem	103
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
9	Dampf- und Kondensatsysteme für verschiedene Einsatzfälle	127
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
	Formelzeichen	137
	Literaturverzeichnis	139
	Stichwortverzeichnis	141

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 ₂	3,80 g/l
MgSO ₄	2,25 g/l
CaSO ₄	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:

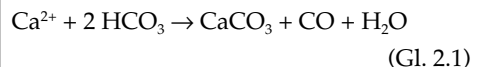
Calciumcarbonat (Kalk)	CaCO ₃ weich und leicht löslich
Magnesiumcarbonat	MgCO ₃ weich und leicht löslich
Calciumsulfat (Gips)	CaSO ₄ hart und schwer löslich
Calciumsilikat	CaSiO ₃ sehr hart und nahezu unlöslich

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 ₂	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 N₂),
- Säurebildner, wie z.B. Chlor in den Salzen, aus dem Wasser zu entfernen.

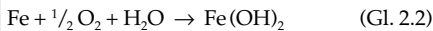
Eine der meisten praktizierten Möglichkeiten ist die Membranabdeckung der freien Wasseroberfläche und falls noch ein Systemüberdruck erforderlich ist, diesen Druck mittels z.B. Stickstoff zu erzeugen. Hierdurch wird vermieden, dass Sauerstoff (bei Luft als Druck-erzeuger) durch die Membrane diffundiert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

2.2.4 Korrosion bei einmaliger Wasserfüllung

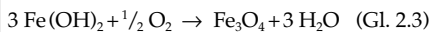
Bei Wassersystemen ohne ständige Wassererneuerung, bei denen der im Wasser gelöste Sauerstoff und die Kohlensäure durch Korrosion verbraucht wird, hängt die verbleibende Korrosivität des Wassers alleine davon ab, in welchem Maße Sauerstoff aus der Atmosphäre in die Anlage gelangen kann.

Beispiel

Stahl reagiert mit sauerstoffhaltigem Wasser zunächst gemäß:



zu **Eisenhydroxid** Fe(OH)_2 , das sich weiter umwandelt:



zu **Magnetit** Fe_3O_4

Bei luftgesättigtem Wasser beträgt der Sauerstoffgehalt ca. 10 mg/l. Aus obiger Gleichung ergibt sich, dass 1 m³ 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.

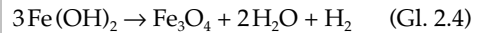
2.3 Gasbildung

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.

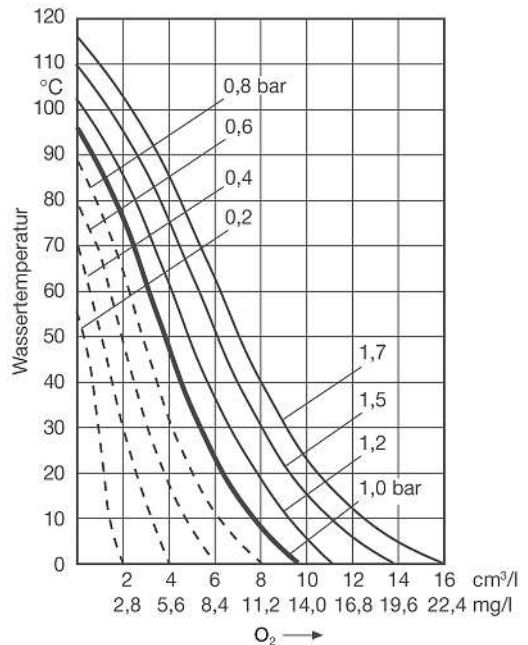


Bild 2.1 Löslichkeit für Sauerstoff in Wasser

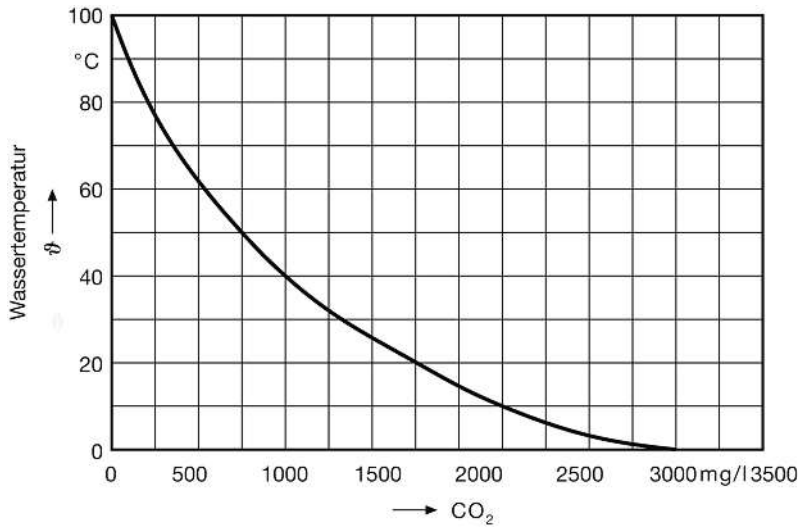


Bild 2.2 Löslichkeit von CO₂ in Wasser ($p = 1$ bar)

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}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 H^+ -Ionen oder 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: