

## 6 Anhang

### 6.1 Das Reynoldssche Transporttheorem

Im Abschnitt 2.2.1 wurde die Kontinuitätsgleichung und die Eulergleichung aus der Stromfadentheorie durch eine differenzielle Betrachtungsweise hergeleitet. In diesem Abschnitt wird mit dem Reynoldsschen Transporttheorem ein integraler Ansatz vorgestellt, der sowohl anschaulicher als auch allgemeiner ist. Ausführliche Darstellungen finden sich in vielen Lehrbüchern, beispielsweise in [Kundu et al. \(2004\)](#) und [Massoud \(2005\)](#). Einerseits lässt sich die Eulergleichung über diesen Ansatz herleiten, andererseits können auch Strömungsprobleme gelöst werden, in denen die Stromfadentheorie nicht anwendbar ist.

In der Stromfadentheorie wird die Bewegungsgleichung eines Flüssigkeitselementes direkt durch die Newtonsche Bewegungsgleichung ausgedrückt. Die Bewegungsgleichung beschreibt die Bahn des Flüssigkeitselements in Raum und Zeit. Dies nennt man die Betrachtungsweise nach Lagrange. Die Transformation zur Eulerschen Betrachtungsweise, in der die Durchströmung eines ortsfesten, infinitesimalen Ausschnitts des Stromfadens beschrieben wird, geschieht durch die totale Ableitung der Strömungsgeschwindigkeit nach Ort und Zeit. Das Reynoldssche Transporttheorem geht von den fundamentalen Erhaltungsgrößen der Masse, des Impulses und der Energie aus. Dabei werden die zeitlichen Änderungen dieser Größen in einem endlichen Volumen betrachtet. Die Anwendung des Reynoldsschen Transporttheorems wird am Beispiel der Massen- und der Impulserhaltung demonstriert.

#### 6.1.1 Erhaltung der Masse

Weil endliche Volumen betrachtet werden, tritt die Masse als Volumenintegral der Dichte  $\rho$  auf. Um die zeitliche Änderung der Masse zu beschreiben, differenziert man das Integral nach der Zeit. Falls das Volumen ortsfest und unveränderlich ist, sind die Integrationsgrenzen konstant und man darf nach dem Leibniz-Theorem die Reihenfolge von Integration und Differentiation vertauschen.

$$\frac{d}{dt} \iiint_V \rho dV = \iiint_V \frac{\partial}{\partial t} \rho dV \quad (6.1)$$

Bei strömenden Medien ist in der Lagrangeschen Betrachtungsweise das Volumen beweglich und seine Integrationsgrenzen daher zeitabhängig. Mit Hilfe des generalisierten Leibniz-Theorems wird die Transformation auf ein feststehendes Kontrollvolumen durchgeführt. Das Volumen des Kontrollvolumens wird mit  $CV$ , seine Oberfläche mit  $CA$  bezeichnet. Auf der rechten Seite kommt noch ein Oberflächenintegral hinzu, weil das Fluid mit der Geschwindigkeit  $w$  durch die Oberfläche des Kontrollvolumens strömt.

Damit lautet der Massenerhaltungssatz nach der Eulerschen Betrachtungsweise in drei Dimensionen

$$\frac{d}{dt} \iiint_V \rho dV = \iiint_{CV} \frac{\partial}{\partial t} \rho dV + \oiint_{CA} \rho \vec{w} \vec{n} dA = 0 . \quad (6.2)$$

Die rechte Seite stellt die Massenbilanz am Kontrollvolumen dar: Die Änderungsrate der Masse innerhalb des Kontrollvolumens  $CV$  muss gleich sein wie der Massenstrom über die Oberfläche des Kontrollvolumens  $CA$ . Dies ist das Reynoldssche Transporttheorem, angewandt auf den Massenerhaltungssatz. Sofern das Strömungsfeld und dessen erste Ableitungen stetig sind, kann das Oberflächenintegral nach dem Satz von Gauß in ein Volumenintegral transformiert werden.

$$\oiint_{CA} \rho \vec{w} \vec{n} dA = \iiint_{CV} \nabla \cdot (\rho \vec{w}) dV \quad (6.3)$$

Einsetzen in Gleichung (6.2) liefert

$$\frac{d}{dt} \iiint_V \rho dV = \iiint_{CV} \left[ \frac{\partial}{\partial t} \rho + \nabla \cdot (\rho \vec{w}) \right] dV = 0 . \quad (6.4)$$

Der Massenerhaltungssatz ist genau dann erfüllt, wenn der Integrand verschwindet.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \nabla \cdot (\rho \vec{w}) = 0 \quad (6.5)$$

Dies ist die differentielle Form des Massenerhaltungssatzes. Sowohl die differentielle als auch die integrale Form beschreiben das System exakt, sofern es gelingt, das Strömungsfeld exakt darzustellen. Dies ist jedoch nur in wenigen Ausnahmen möglich. In der Thermohydraulik bildet man daher Mittelwerte über den Strömungsquerschnitt und stellt das Strömungsfeld eindimensional dar. Damit resultiert die differentielle Form des Massenerhaltungssatzes wie in Gleichung (2.2) im Abschnitt 2.2.1.1.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \frac{\partial}{\partial t} \rho w = 0 \quad (6.6)$$

Die Integrale und differentielle Formen der Erhaltungsgleichungen sind äquivalent.

## 6.1.2 Erhaltung des Impulses

Die Darstellung des Impulserhaltungssatzes durch das Reynoldssche Transporttheorem liefert

$$\frac{d}{dt} \iiint_V \rho \vec{w} dV = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho \vec{w} dV + \oiint_{CA} \rho \vec{w} (\vec{w} \cdot \vec{n}) dA = \sum F_{CV} + \sum F_{CA} \quad (6.7)$$

mit der Impulsdichte  $\rho \vec{w}$  und der Impulsstromdichte  $\rho \vec{w} (\vec{w} \vec{n})$

Die linke Seite beschreibt die Änderung des Impulses innerhalb des Materievolumens  $V$  nach Lagrange. Die rechte Seite beschreibt die Änderung des Impulses in einem endlichen, ortsfesten und unveränderlichen Kontrollvolumen nach Euler. Das erste Integral auf der rechten Seite beschreibt die Änderung der Impulsdichte innerhalb des Kontrollvolumens. Das zweite Integral auf der rechten Seite beschreibt die über die Oberfläche ein- bzw. ausströmende Impulsstromdichte. Sofern das Vektorfeld der Impulsstromdichte und dessen erste Ableitungen stetig sind, kann wiederum das Oberflächenintegral nach dem Satz von Gauß in ein Volumenintegral transformiert werden. Der Impulssatz beschreibt totale Änderung der Impulsdichte als Folge der Volumenkräfte, die an den Flüssigkeitsteilchen angreifen und der Kräfte, die an den Oberflächen des Kontrollvolumens wirksam sind. Wenn man sich auf reibungsfreie Strömungen beschränkt, sind nur die Schwerkraft und die Druckkräfte zu berücksichtigen. Der Impulssatz lautet mit diesen Vereinfachungen

$$\int_{CV} \left[ \frac{\partial}{\partial t} \rho \vec{w} + \nabla \cdot (\rho \vec{w} \vec{w}) \right] dV = \int_{CV} \rho \vec{g} dV + \int_{CA} p \vec{n} dA . \quad (6.8)$$

Das erste Integral auf der rechten Seite beschreibt die Volumenkraft der Gravitation. Das zweite Integral beschreibt die Oberflächenkraft des Druckes. Dieses lässt sich nach dem Satz von Gauß ebenfalls in ein Volumenintegral transformieren.

$$\int_{CA} p \vec{n} dA = \int_{CV} \nabla p dV \quad (6.9)$$

Für inkompressible Medien vereinfacht sich der zweite Integrand auf der linken Seite.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{w} \vec{w}) = \rho \nabla \cdot (\vec{w} \vec{w}) \quad (6.10)$$

Schließlich lassen sich alle Integrale auf die linke Seite bringen und zusammenfassen.

$$\int_{CV} \left[ \frac{\partial}{\partial t} \rho \vec{w} + \rho \nabla \cdot (\vec{w} \vec{w}) + \rho \vec{g} + \nabla p \right] dV = 0 \quad (6.11)$$

Im eindimensionalen Fall lautet das Integral

$$\int_{CV} \left[ \frac{\partial}{\partial t} \rho w + \rho \frac{\partial}{\partial x} \cdot w^2 + \rho g \frac{\partial}{\partial x} z + \frac{\partial}{\partial x} p \right] dV = 0 \quad (6.12)$$

Dieses Integral verschwindet genau dann, wenn der Integrand selber null ist. Indem man die am Kontrollvolumen wirksamen Kräfte auf die rechte Seite bringt, erhält man

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho w + \rho \frac{\partial}{\partial x} w^2 = - \frac{\partial}{\partial x} p - \rho g \frac{\partial}{\partial x} z \quad (6.13)$$

Dies ist eine Bewegungsgleichung, in der die Bewegungsgröße der Impuls ist. In der Eulergleichung hingegen ist die Bewegungsgröße die Geschwindigkeit. Wie folgender Beweis zeigt, sind beide Formen äquivalent.

Zunächst wird die linke Seite ausdifferenziert

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \rho w + \rho \frac{\partial}{\partial x} w^2 &= \rho \frac{\partial w}{\partial t} + w \frac{\partial}{\partial t} \rho + 2\rho \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \\ &= \rho \frac{\partial w}{\partial t} + w \left( \frac{\partial}{\partial t} \rho + \rho \frac{\partial w}{\partial x} \right) + w \rho \frac{\partial w}{\partial x} \end{aligned} \quad (6.14)$$

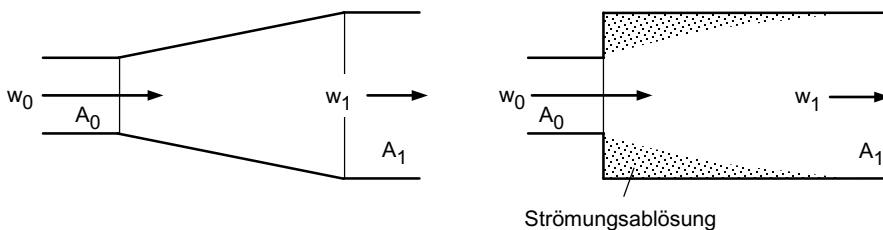
Der Ausdruck in der Klammer ist identisch mit der linken Seite der Massenerhaltungsgleichung (6.6). Die Summe ihrer Terme ist null, und es folgt die bekannte Form der Eulergleichung.

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho w \frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x} p - \rho g \frac{\partial}{\partial x} z \quad (6.15)$$

Die Stetigkeit des Vektorfeldes der Impulsstromdichte war die entscheidende Voraussetzung in dieser Herleitung. Dadurch wurde die Anwendung des Integralsatzes von Gauß möglich, und alle Terme konnten als Integranden eines einzigen Volumenintegrals dargestellt werden. Unter dieser Voraussetzung ist also auch die Stromfadentheorie anwendbar.

### 6.1.3 Anwendung des Reynoldsschen Transporttheorems in Integralform

Das Reynoldssche Transporttheorem ist ein hervorragendes Werkzeug, um Erhaltungsgleichungen in differenzieller Form herzuleiten. Seine Leistungsfähigkeit kommt aber auch in der ursprünglichen Form zum Ausdruck. Es lässt sich auch in Fällen anwenden, wo die Voraussetzungen der Stromfadentheorie nicht gegeben sind. Dies soll an den Beispielen des verlustfreien Bernoulli-Diffusors und des verlustbehafteten Carnot-Diffusors nach [Abbildung 6-1](#) veranschaulicht werden.



**Abbildung 6-1** Schematische Darstellungen eines verlustfreien Bernoulli-Diffusors (links) und eines Carnot-Diffusors (rechts).

### 6.1.3.1 Verlustfreier Bernoulli-Diffusor

Bei einer allmählichen Querschnittserweiterung mit gerundeten Kanten lassen sich die Strömungsablösung und ein damit verbundener Druckverlust vermeiden. In praktischen Berechnungen würde man den Druckverlust durch Wandreibung im Diffusor nicht berechnen, sondern durch einen entsprechenden Längenzuschlag im zylindrischen Anschlussrohr berücksichtigen. Weil keine Strömungsablösungen auftreten, sind die Stromfadentheorie und damit auch die Bernoulligleichung anwendbar.

Im reibungsfreien Fall eines horizontalen Bernoulli-Diffusors beträgt der Druckgewinn durch die Verzögerung der Strömung

$$(p_1 - p_0)_{Bernoulli} = \frac{\rho}{2} (w_0^2 - w_1^2) = \frac{\rho}{2} w_0^2 \left( 1 - \frac{A_0^2}{A_1^2} \right). \quad (6.16)$$

Kinetische Energie kann also vollständig in Druckenergie umgewandelt werden.

### 6.1.3.2 Stoßverlust im Carnot-Diffusor

Eine sprunghafte Querschnittserweiterung in zylindrischen Rohren wird als Carnot-Diffusor bezeichnet. An den scharfen Kanten des Überganges löst sich die Strömung ab. Die Wirbelbildung führt zu einem entsprechenden Druckverlust. Die kinetische Energie kann nicht mehr vollständig in Druckenergie umgewandelt werden. Der Carnot-Diffusor ist eines der wenigen Beispiele, das analytisch berechnet werden kann. Dazu wird angenommen, dass der statische Druck in der Grenzschicht über der Ringfläche der Rohrerweiterung gleich dem statischen Druck am Ende des kleineren Rohres ist. Nun konstruiert man ein Kontrollvolumen, welches durch die Eintrittsöffnung des kleineren Rohres, die Ringfläche der Rohrerweiterung, ein Stück der zylindrischen Mantelfläche des größeren Rohres sowie dessen Querschnittsfläche gebildet ist. Auch hier wird der Druckverlust durch Wandreibung nicht berechnet, sondern durch einen entsprechenden Längenzuschlag im zylindrischen Anschlussrohr berücksichtigt. Bei stationärer Strömung liefert das Oberflächenintegral über die Impulsstromdichte folgenden einfachen Ausdruck für die Reaktionskraft, die über die Oberfläche auf das Kontrollvolumen einwirkt:

$$\oint_{CS} \rho \vec{w} (\vec{w} \cdot \vec{n}) dS = -\rho w_0^2 A_0 + \rho w_1^2 A_1 = p_1 A_1 + p_0 (A_1 - A_0) - p_1 A_1 \quad (6.17)$$

Mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung (2.5) kann die Fließgeschwindigkeit im größeren Querschnitt durch jene im kleineren Querschnitt ausgedrückt werden.

$$w_1 = w_0 \frac{A_0}{A_1} \quad (6.18)$$

Diese Kraft ist im Gleichgewicht mit den einwirkenden Druckkräften.

$$\rho w_0^2 \frac{A_0^2}{A_1} - \rho w_1^2 A_0 = p_0 A_0 + p_0 (A_1 - A_0) - p_1 A_1 = A_1 (p_0 - p_1) \tag{6.19}$$

Der Druckgewinn durch die Verzögerung der Strömung ist kleiner als beim Bernoulli-Diffusor. Er beträgt

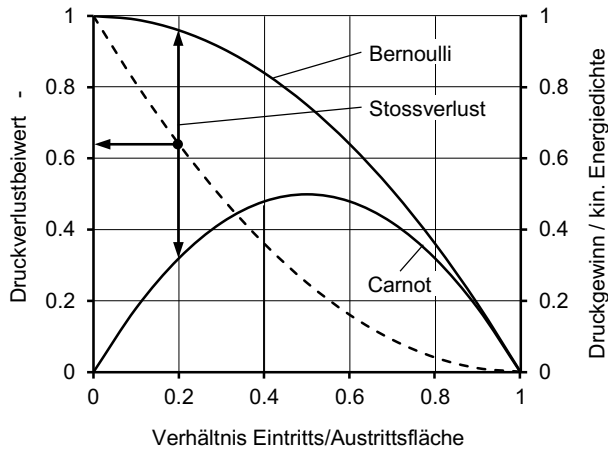
$$(p_1 - p_0)_{Carnot} = \rho w_1^2 \frac{A_0}{A_1} - \rho w_1^2 \frac{A_0^2}{A_1^2} = \frac{\rho}{2} w_0^2 \cdot 2 \frac{A_0}{A_1} \left(1 - \frac{A_0}{A_1}\right). \tag{6.20}$$

Bezieht man den Druckgewinn auf die kinetische Energiedichte am Eintritt, so erhält man einen dimensionslosen Druckgewinn, der als Funktion des Flächenverhältnisses in [Abbildung 6-2](#) dargestellt ist.

$$\frac{p_1 - p_0}{\frac{\rho}{2} w_0^2} \tag{6.21}$$

Der Stoßverlust ist die Differenz zwischen dem Druckgewinn des Bernoulli-Diffusors und jenem des Carnot-Diffusors. Dieser Stoßverlust kann als Produkt der kinetischen Energiedichte am Eintritt mit einem Druckverlustbeiwert  $\zeta$  ausgedrückt werden.

$$\Delta p_{Carnot} = \xi \frac{\rho}{2} w_0^2 \quad \text{mit} \quad \xi = \left(1 - \frac{A_0}{A_1}\right)^2 = \left(1 - \frac{d_0^2}{d_1^2}\right)^2 \tag{6.22}$$



**Abbildung 6-2** Druckverlustbeiwert des Carnot-Diffusors sowie Druckgewinn in Bernoulli- und Carnot-Diffusor.

Der Stoßverlust des Carnot-Diffusors kann in der Bernoulligleichung berücksichtigt werden. Für die praktische Berechnung nimmt man an, dass der Stoßverlust entlang einer sehr kurzen Strecke auftritt, sodass die Differenz der Schweredrucke vernachlässigbar ist.

$$p_2 + \frac{\rho}{2} w_2^2 = p_1 + \frac{\rho}{2} w_1^2 + \xi \frac{\rho}{2} w_1^2 \quad (6.23)$$

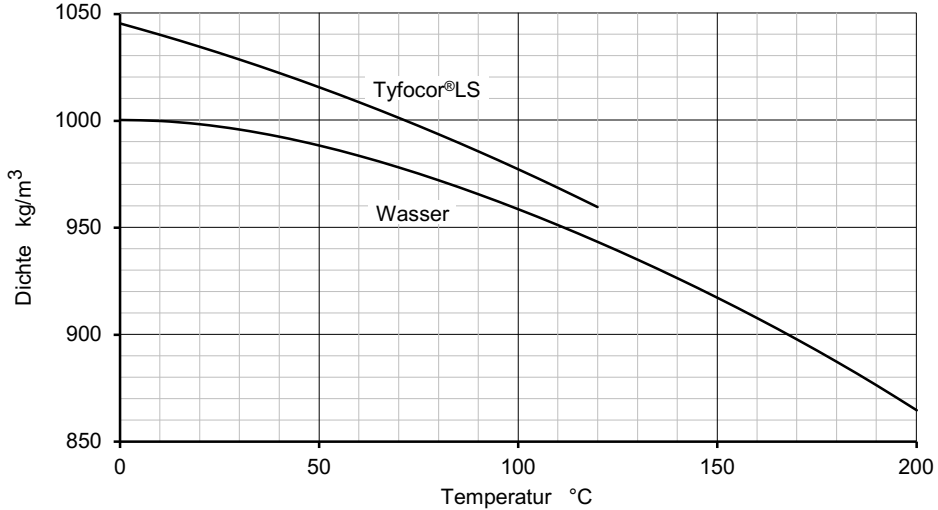
## 6.2 Stoffdaten

Stoffdaten werden in der Fachliteratur meist als Zahlenwerte in Tabellen oder in Diagrammform angegeben. Im VDI Wärmeatlas (2013) sind die Stoffdaten für Wasser und weitere Fluide mit Hilfe der neuesten Modelle berechnet und in umfangreichen Tabellen dargestellt. In den Datenblättern der Hersteller sind die technisch wichtigen Stoffdaten meist in Diagrammen angegeben. Diese beruhen auf Laborversuchen. Einige Hersteller bieten auch Programme an, mit denen die Stoffdaten berechnet und als Tabellen ausgegeben werden können. Sowohl die eigenen Experimente als auch die an der TU Dresden durchgeführten Untersuchungen zur Gaslöslichkeit wurden mit Tyfocor<sup>®</sup>LS durchgeführt, einem Gemisch aus 55 bis 58 Massenprozenten vollentsalztem Wasser, Monopropylenglykol und ein bis zwei Massenprozenten Diisopropanolamin als Korrosionsinhibitor (TYFOROP 2011), (TYFOROP 2013). Die Stoffdaten der Wasser-Propylenglykol Gemische verschiedener Hersteller unterscheiden sich praktisch nicht, sofern sie denselben Wasseranteil aufweisen.

Für numerische Rechenverfahren ist es zweckmäßig die Stoffwerte durch mathematische Funktion zu approximieren. Die nachfolgend dargestellten Funktionen basieren auf den im VDI Wärmeatlas und im Datenblatt für Tyfocor<sup>®</sup>LS dargestellten Werten. Sie gelten nur in dem spezifizierten Temperaturbereich. Die mit diesen Korrelationen berechneten Werte stimmen mit den Tabellenwerten und dem Datenblatt nicht exakt überein, was für praktische Berechnungen tolerierbar ist. Die Funktionen dürfen nur in dem angegebenen Temperaturbereich und für die Mischung aus 55–58 % Wasser und Propylenglykol verwendet werden. Für andere Mischungsverhältnisse, Fluidkombinationen und Temperaturbereiche lassen sich entsprechende Funktionen sehr einfach mit Hilfe von EXCEL oder Matlab ermitteln.

## 6.2.1 Dichte

Die Dichten von Wasser im Sättigungszustand und Tyfocor<sup>®</sup>LS nach [Abbildung 6-3](#) können durch die Polynome (6.24) und (6.25) dargestellt werden.



**Abbildung 6-3** Dichte von Wasser im Sättigungszustand sowie von Tyfocor<sup>®</sup>LS.

$$\rho_W = \begin{aligned} &999.99 + 10.692 \cdot 10^{-3} \vartheta - 5.8765 \cdot 10^{-3} \vartheta^2 \\ &+ 19.923 \cdot 10^{-6} \vartheta^3 - 38.635 \cdot 10^{-9} \vartheta^4 \end{aligned} \quad (6.24)$$

$$\rho_G = 1045 - 0.50997 \cdot \vartheta - 16.984 \cdot 10^{-3} \vartheta^2 \quad (6.25)$$

Polynome dürfen keinesfalls außerhalb ihres Gültigkeitsbereiches verwendet werden. Die berechneten Funktionswerte können stark vom realen Verhalten abweichen.



## 6.2.2 Kinematische Viskosität

Abbildung 6-4 zeigt die kinematischen Viskositäten Wasser im Sättigungszustand und von Tyfocor<sup>®</sup>LS.

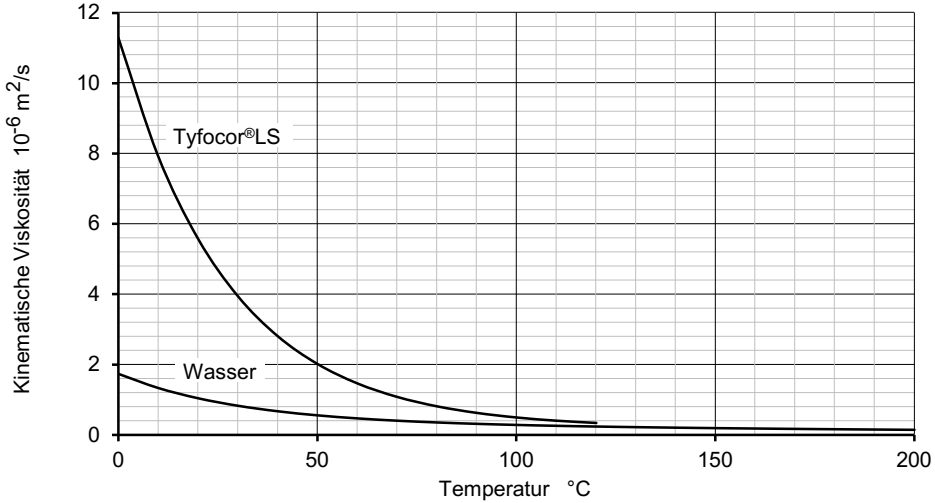


Abbildung 6-4 Kinematische Viskosität von Wasser im Sättigungszustand sowie von Tyfocor<sup>®</sup>LS.

$$\nu_W = 1.346 \cdot 10^{-6} \exp\left(-33.41 \cdot 10^{-3} \vartheta\right) + 0.3907 \cdot 10^{-6} \exp\left(-4.963 \cdot 10^{-6} \vartheta\right) \quad (6.26)$$

$$\nu_G = 11.06 \cdot 10^{-6} \exp\left(-36.23 \cdot 10^{-3} \vartheta\right) + 0.2186 \cdot 10^{-6} \exp\left(-0.6668 \cdot \vartheta\right) \quad (6.27)$$

Mit Hilfe der Funktionen (6.26) und (6.27) werden die kinematischen Viskositäten in  $m^2/s$  berechnet. Die Extrapolation zu höheren Temperaturen ist unkritisch.

### 6.2.3 Spezifische Wärme

Abbildung 6-5 stellt die spezifische Wärme von Wasser im Sättigungszustand sowie von Tyfocor<sup>®</sup>LS dar.

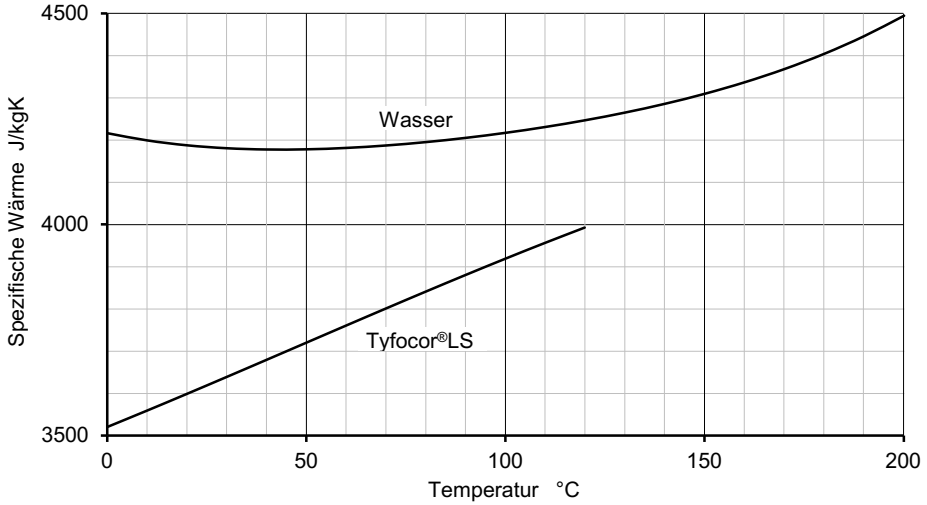


Abbildung 6-5 Spezifische Wärme von Wasser im Sättigungszustand sowie von Tyfocor<sup>®</sup>LS.

$$c_{l,W} = \begin{aligned} &4216.5 - 2.0156 \cdot \vartheta + 31.838 \cdot 10^{-3} \vartheta^2 \\ &- 157.98 \cdot 10^{-6} \vartheta^3 + 420.03 \cdot 10^{-9} \vartheta^4 \end{aligned} \quad (6.28)$$

$$c_{l,G} = 3520.9 + 3.8329 \cdot \vartheta + 4.6703 \cdot 10^{-3} \vartheta^2 - 32.051 \cdot 10^{-6} \vartheta^3 \quad (6.29)$$

Mit den Polynomen (6.28) und (6.29) werden die spezifischen Wärmen in  $J/kgK$  berechnet.

### 6.2.4 Spezifische Enthalpie und Verdampfungsenthalpie

Abbildung 6-6 zeigt die spezifischen Enthalpien von Wasser und Wasserdampf im Sättigungszustand sowie die spezifische Verdampfungsenthalpie als Differenz dieser beiden Enthalpien.

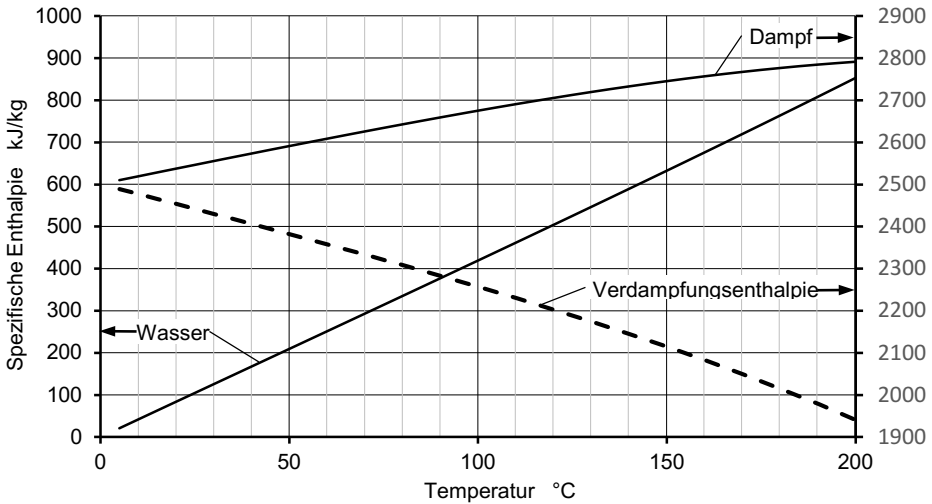


Abbildung 6-6 Spezifische Verdampfungsenthalpie und spezifische Enthalpie von Wasser und Dampf im Sättigungszustand.

$$h_g = 2501.4 \cdot 10^3 + 1787.6 \cdot \vartheta + 0.76591 \cdot \vartheta^2 - 12.159 \cdot 10^{-3} \vartheta^3 \quad (6.30)$$

$$h_l = 4206.5 \cdot 10^3 \vartheta - 59.039 \cdot \vartheta^2 + 4.3268 \cdot 10^{-3} \vartheta^3 \quad (6.31)$$

$$h_v = h_g - h_l = 2501.4 \cdot 10^3 - 2418.9 \cdot \vartheta + 1.3563 \cdot \vartheta^2 - 16.486 \cdot 10^{-3} \vartheta^3 \quad (6.32)$$

Die Polynome (6.30) - (6.32) berechnen die Enthalpien in J/kg.

## 6.2.5 Dampfdruck

Abbildung 6-7 stellt den Dampfdruck von Wasser und Tyfocor<sup>®</sup>LS dar.

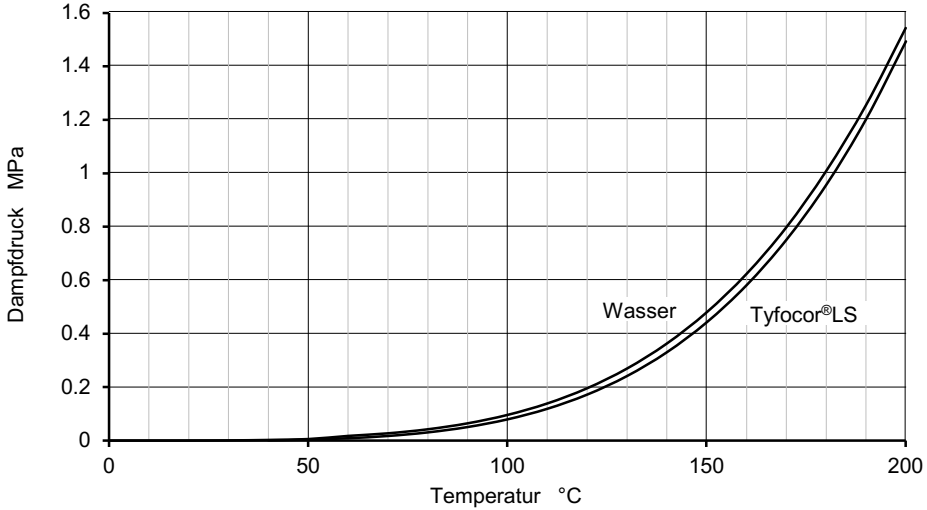


Abbildung 6-7 Dampfdruck von Wasser und Tyfocor<sup>®</sup>LS, einer Wasser-Propylenglykol Gemisch mit 55–58 % Wasser.

$$p_{v,W} = 0.7517 \cdot 10^{-3} g^{4.047} \quad (6.33)$$

$$p_{v,G} = 0.2787 \cdot 10^{-3} g^{4.228} \quad (6.34)$$

Die Potenzfunktionen (6.33) und (6.34) liefern den Dampfdruck in Pa. Der Dampfdruck von Tyfocor LS liegt nur wenig unter dem von Wasser. Dies ist der Grund, weshalb man mit der thermohydraulischen Simulation unter Verwendung der Stoffdaten von Wasser realitätsnahe Ergebnisse erzielt. Um dieselbe Siedetemperatur zu erreichen, braucht man bei Wasser lediglich den Druck etwas zu erhöhen.

### 6.2.6 Oberflächenspannung

Abbildung 6-8 stellt die von Nakanishi et al. (1971) gemessenen Werte für Gemische aus Wasser und Propylenglykol bei einer Temperatur von 30 °C dar. Die Messdaten können durch folgende Funktion korreliert werden.

$$\sigma = 0.04861 \cdot \exp\left(-1.394 \cdot x_m^{0.75}\right) + 0.02281 \quad N/m \quad (6.35)$$

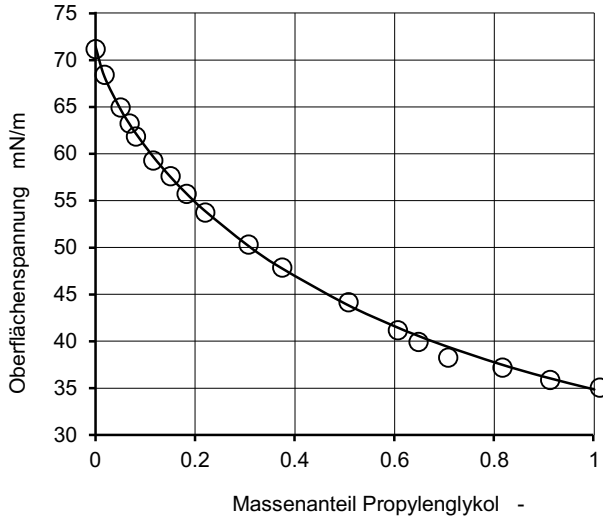
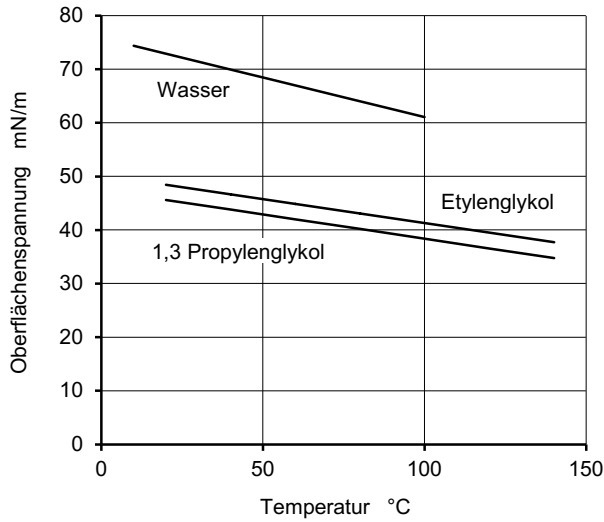


Abbildung 6-8 Oberflächenspannung von 1,2 Propylenglykol-Wasser Gemischen bei 30 °C nach Nakanishi et al. (1971).

Der Zusammenhang zwischen Konzentration und Oberflächenspannung ist nicht linear. In der Regel dominiert die Komponente mit der geringeren Oberflächenspannung. Die Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung nach Jasper (1972) ist für Wasser, Ethylenglykol und 1,3 Propylenglykol in Abbildung 6-9 dargestellt. Die Temperaturabhängigkeit lässt sich durch lineare Funktionen mit den Koeffizienten nach Tabelle 6-1 darstellen. Der Wert für 1,3 Propylenglykol bei 30 °C stimmt praktisch mit dem Wert für 1,2 Propylenglykol – Wasser bei einem Glykolanteil von  $x_m = 0.45$  überein.

Tabelle 6-1 Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung nach Jasper (1972).

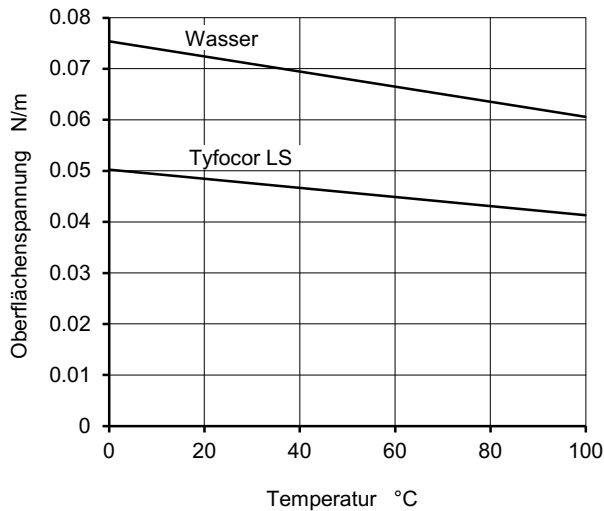
$\sigma = a - b \cdot T$	$a$	$mN/m$	$b$	$mN/Km$
Wasser	75.38		0.1477	
Ethylenglykol	47.43		0.0903	
1,3 Propylenglykol	50.21		0.0890	



**Abbildung 6-9** Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung nach Jasper (1972).

Unter der Annahme, dass der Einfluss der Korrosionsinhibitoren auf die Oberflächenspannung vernachlässigbar ist, kann diese für Tyfocor<sup>®</sup>LS durch die Gleichung für 1,3Propylenglykol dargestellt werden.

$$\sigma = 0.05021 - 8.9 \cdot 10^{-5} \vartheta \tag{6.36}$$



**Abbildung 6-10** Oberflächenspannung für Wasser und Tyfocor<sup>®</sup>LS als Funktion der Temperatur.

## 6.3 Literatur

- Jasper J. J. (1972) The Surface Tension of Pure Liquid Compounds. *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 1:841. doi:10.1063/1.3253106
- Kundu P. K., Cohen I. M., Hu H. H. (2004) *Fluid mechanics*. 3rd ed. Aufl. Academic Press, San Diego
- Massoud M. (2005) *Engineering Thermofluids*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- Nakanishi K., Matsumoto T., Hayatsu M. (1971) Surface tension of aqueous solutions of some glycols. *Journal of Chemical & Engineering Data* 16 (1):44-45. doi:10.1021/je60048a010
- TYFOROP (2011) Sicherheitsdatenblatt: TYFOCOR LS. TYFOROP CHEMIE GmbH. [http://www.tyfo.de/docs/TI-TYFOCOR-LS\\_de\\_2013.pdf](http://www.tyfo.de/docs/TI-TYFOCOR-LS_de_2013.pdf).
- TYFOROP (2013) Technische Information: TYFOCOR LS. TYFOROP CHEMIE GmbH. [http://www.tyfo.de/docs/TI-TYFOCOR-LS\\_de\\_2013.pdf](http://www.tyfo.de/docs/TI-TYFOCOR-LS_de_2013.pdf).
- VDI (2013) *VDI-Wärmeatlas*. 11. Aufl. Springer-Verlag, Heidelberg, Dordrecht, London, New York. doi:10.1007/978-3-642-19981-3

## 6.4 Symbolverzeichnis

<i>Symbol</i>	<i>Bedeutung</i>	<i>Einheit</i>
$A$	Fläche	$m^2$
$A_K$	Fläche eines Kollektorelementes, allgemein	$m^2$
$A_{K,G}$	Bruttofläche eines Kollektorelementes (G = gross area)	$m^2$
$A_{K,A}$	Aperturfläche eines Kollektorelementes (A = aperture)	$m^2$
$A_{K,P}$	Absorberfläche eines Kollektorelementes (P = plate)	$m^2$
$A_{KS}$	Fläche eines Kollektorstranges, allgemein	$m^2$
$A_{KR}$	Fläche einer Kollektorreihe, allgemein	$m^2$
$A_{KF}$	Fläche eines Kollektorfeldes, allgemein	$m^2$
$A_t$	Strömungsquerschnitt des Rohres	$m^2$
$A_{tw}$	Wandquerschnitt des Rohres	$m^2$
$a_1$	Wärmeverlustkoeffizient des Kollektors $\sim T$	$W/Km^2$
$a_2$	Wärmeverlustkoeffizient des Kollektors $\sim T^2$	$W/K^2m^2$
$C$	Konstante in Korrelationen zur Gegenstrombegrenzung	–
$C_0$	Phasenverteilungsparameter in Drift-Flux Modellen	–
$C_t$	Längenbezogene spezifische Wärme des Rohres	$J/Km$
$\bar{c}$	Molkonzentration der Mischung	$mol/m^3$
$c_g ; c_l$	Spezifische Wärme der Gas- und Flüssigphase	$J/kgK$
$c_K$	Flächenbezogene Wärmekapazität des Kollektors	$J/m^2K$
$D_W$	Durchmesser der Rohrwendel	$m$
$D$	Krümmungsdurchmesser der Rohrwendel	$m$
$d_t$	Rohrdurchmesser innen (t = tube)	$m$
$d_a$	Rohrdurchmesser außen	$m$
$e$	Spezifische Energie	$J/kg$
$f$	Rohrreibungszahl nach Fanning	–
$F_A$	Auftriebskraft	$N$
$F_R$	Reibungskraft	$N$
$F_\sigma$	Kraft infolge Grenzflächenspannung	$N$
$g$	Erdbeschleunigung = 9.81	$m/s^2$
$G$	Bestrahlungsstärke in der Kollektorebene	$W/m^2$
$H$	Enthalpie	$J$



$H_i$	Henry-Koeffizient der Gaslöslichkeit	Pa
$H_v$	Verdampfungsenthalpie	J
$h_v$	Spezifische Verdampfungsenthalpie	J/kg
$h_{Anl}$	Anlagenhöhe über Meeresspiegel	m
$h_H$	Höhendifferenz zwischen MAG und Anlagenhochpunkt	m
$h_K$	Höhendifferenz zwischen MAG und oberem Kollektoranschluss	m
$h_{KT}$	Höhendifferenz zwischen MAG und Kollektortiefpunkt	m
$h_{Man}$	Höhendifferenz zwischen MAG und Manometer	m
$h_P$	Höhendifferenz zwischen MAG und Saugstutzen der Pumpe	m
$h_g ; h_l$	Spezifische Enthalpie der Gas- und Flüssigphase	J/kg
$j$	Totale Volumenstromdichte	m/s
$j_g ; j_l$	Volumenstromdichte der Gas- und Flüssigphase	m/s
$k$	Rauigkeit der Rohrwand	m
$k_t$	Wärmedurchgangskoeffizient des Rohres	W/Km <sup>2</sup>
$l$	Länge	m
$l_c$	Charakteristische Länge	m
$l_G$	Länge eines Glattrohres	m
$l_W$	Länge eines Metallbalges oder Wellschlauches	m
$l_{RI} ; l_{VI}$	Länge der Vor- bzw. Rücklaufleitung	m
$\Delta l$	Längendifferenz	m
$M$	Molmasse	kg/mol
$m$	Masse	kg
$m$	Faktor in Korrelationen zur Gegenstrombegrenzung	–
$m$	Anzahl seriell zu einem Strang verbundene Absorberelemente	–
$\dot{m}$	Massenstrom	kg/s
$\dot{m}_g ; \dot{m}_l$	Massenstrom der Gas- und Flüssigphase	kg/s
$m_{r,KF}$	Restmenge Flüssigkeit im Kollektorfeld	kg
$N_A$	Avogadrozahl = $6.0221 \cdot 10^{23}$	1/mol
$n$	Stoffmenge (Molzahl)	mol
$n$	Anzahl parallel geschaltete Stränge	–
$P$	Leistung	W
$P_d^*$	Dampfproduktionsleistung, bezogen auf die Kollektorfläche	W/m <sup>2</sup>
$P_v$	Dampfleistung	W
$p$	Druck	Pa

$p_{Atm}$	Atmosphärendruck	$Pa$
$p_i$	Partialdruck der Gaskomponente $i$	$Pa$
$p_a$	Anfangsdruck im MAG nach VDI 4908	$Pa$
$p_e$	Enddruck im MAG nach VDI 4908	$Pa$
$p_B$	Betriebsdruck im MAG bei max. Kreislauftemperaturen	$Pa$
$p_F$	Betriebsdruck im MAG bei Füllbedingungen	$Pa$
$p_H$	Druck am Hochpunkt der Anlage	$Pa$
$p_K$	Druck am Hochpunkt des Kollektorfeldes	$Pa$
$p_R$	Referenzdruck im MAG bei min. Kreislauftemperaturen	$Pa$
$p_S$	Maximaldruck im MAG bei Stagnation	$Pa$
$p_{SV}$	Ansprechdruck des Sicherheitsventils	$Pa$
$\Delta p_{SV}$	Schließdruckdifferenz des Sicherheitsventils	$Pa$
$p_v$	Dampfdruck	$Pa$
$p_z$	Erforderlicher Zulaufdruck der Pumpe	$Pa$
$p_0$	Vordruck im MAG	$Pa$
$p_{0,opt}$	Theoretisch optimaler Vordruck	$Pa$
$p_{0,max}$	Praktischer Maximalwert des Vordrucks	$Pa$
$p_{0,min}$	Praktischer Minimalwert des Vordrucks	$Pa$
$\delta p$	Unsicherheit der Druckmessung	$Pa$
$\Delta p$	Druckdifferenz, Druckverlust	$Pa$
$\Delta p_P$	Pumpendruck	$Pa$
$\Delta p_H$	Druckverlust zwischen Referenzpunkt und Anlagenhochpunkt	$Pa$
$\Delta p_K$	Druckverlust zwischen Referenzpunkt und Kollektorhochpunkt	$Pa$
$\Delta p_R$	Druckverlust zwischen Referenzpunkt und Saugstutzen Pumpe	$Pa$
$\Delta p_z$	Druckzuschlag nach VDI 4708	$Pa$
$\Delta p_{z0}$	Teildruckzuschlag zum Atmosphären- bzw. Dampfdruck	$Pa$
$\Delta p_{z1}$	Teildruckzuschlag zur Kompensation von Gasdruckverlusten	$Pa$
$\Delta p_{z2}$	Teildruckzuschlag zur Erzeugung der Wasservorlage	$Pa$
$Q$	Volumenstrom	$m^3/s$
$\tilde{Q}$	Volumenstrom, bezogen auf die Kollektorfläche	$m^3/m^2s$
$\dot{Q}$	Wärmeverlustleistung	$W$
$R$	Universelle Gaskonstante = 8.3144598	$J/molK$

$s$	Schlupf	–
$T$	Absolute Temperatur	$K$
$T_a$	Umgebungstemperatur (a = ambient)	$K$
$T_{a,N}$	Normtemperatur der Atmosphäre auf Meereshöhe	$K$
$T_\alpha; T_\omega$	Eintritts- und Austrittstemperatur	$K$
$T_k$	Mittlere Temperatur der k-ten Komponente des Kreislaufs	$K$
$T_m$	Mittlere Fluidtemperatur im Kollektor	$K$
$T_{ref}$	Referenztemperatur des Ausdehnungsgefäßes	$K$
$T_{a,N}$	Normtemperatur der Atmosphäre auf Meereshöhe	$K$
$T_{VI}; T_{RI}$	Vorlauf- und Rücklauftemperatur	$K$
$\langle T_{A,X} \rangle$	Mittlere Kreislauftemperatur im Zustand X	$K$
$\delta T$	Unsicherheit bei der Temperaturmessung	$K$
$\Delta T$	Temperaturänderung	$K$
$\Delta T_K$	Max. Abweichung der Austrittstemperatur des Kollektors	$K$
$U_L$	Wärmeverlustkoeff. der linearisierten Wirkungsgradkennlinie	$W/Km^2$
$u$	Spezifische innere Energie	$J/kg$
$\cdot U_{gj} \cdot$	Mittlere Driftgeschwindigkeit	$m/s$
$V$	Volumen	$m^3$
$V_A$	Anlagenvolumen	$m^3$
$V_B$	Gasvolumen im MAG bei max. Kreislauftemperatur	$m^3$
$V_F$	Gasvolumen im MAG bei Füll- und Prüfbedingungen	$m^3$
$V_K$	Volumen eines Kollektors	$m^3$
$V_{KF}$	Volumen des Kollektorfeldes	$m^3$
$V_N$	Nennvolumen des MAG (Nominal volume)	$m^3$
$V_{Res}$	Reservevolumen zur Kompensation von Flüssigkeitsverlusten	$m^3$
$V_S$	Gasvolumen im MAG bei Stagnation	$m^3$
$V_{SK}$	Volumen Solarkreis	$m^3$
$V_V$	Wasservorlage im MAG	$m^3$
$V_{V,eff}$	Effektive Wasservorlage im MAG	$m^3$
$V_{V,min}$	Minimal erforderliche Wasservorlage im MAG	$m^3$
$V_v^*$	Dampfvolumen, bezogen auf die Kollektorfläche	$m^3$
$V_Z$	Prozessvolumen ( $\sim$ Dampfvolumen)	$m^3$

$\Delta V_{A,B}$	Änderung des Flüssigkeitsinhaltes (max. Kreislaufftemperaturen)	$m^3$
$\Delta V_{A,F}$	Änderung des Flüssigkeitsinhaltes (Füll-, Kontrollbedingungen)	$m^3$
$\Delta V_{A,S}$	Änderung des Flüssigkeitsinhaltes (Stagnation)	$m^3$
$w$	Strömungs- oder Fließgeschwindigkeit	$m/s$
$w_g ; w_l$	Fließgeschwindigkeit der Gas- und Flüssigphase	$m/s$
$w_{gj}$	Lokale Driftgeschwindigkeit	$m/s$
$w_{SE}$	Selbstentlüftungsgeschwindigkeit	$m/s$
$x$	Ortskoordinate	$m$
$x$	Dampfgehalt	–
$\dot{x}$	Strömungsdampfgehalt	–
$x_i$	Molanteil der Komponente $i$ in der Flüssigphase	–
$x_{m,i}$	Massenanteil der Komponente $i$ in der Flüssigphase	–
$y_i$	Molanteil der Komponente $i$ in der Gasphase	–
$z$	Koordinate in vertikaler Richtung	$m$

---

Griechische Symbole

$\alpha$	Exponent der Dampfleistung	–
$\alpha_c$	Wärmeübergangskoeffizient bei Konvektion	$W/Km^2$
$\alpha_{cd}$	Wärmeübergangskoeffizient bei Kondensation	$W/Km^2$
$\beta$	Raumausdehnungskoeffizient	$1/K$
$\Gamma$	Volumenbezogener Massenstrom bei Phasenänderung	$kg/m^3s$
$\gamma$	Längenausdehnungskoeffizient	$1/K$
$\varepsilon$	Gasvolumenanteil	–
$\dot{\varepsilon}$	Volumetrischer Strömungsdampfgehalt	–
$\zeta$	Lokaler Druckverlustbeiwert	–
$\eta$	Wirkungsgrad des Kollektors	–
$\eta_0$	Konversionsfaktor	–
$\vartheta$	Temperatur	$^\circ C$
$\lambda$	Rohrreibungszahl	–
$\lambda$	Technischer Löslichkeitskoeffizient	$m^3/kg \cdot bar$
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	$W/Km$
$\mu_1 ; \mu_2$	Korrekturfaktoren für den Flüssigvolumenanteil	–
$\nu_g ; \nu_l$	Kinematische Viskosität der Gas- und Flüssigphase	$m^2/s$

$\rho_g ; \rho_l$	Dichte der Gas- und Flüssigphase	$kg/m^3$
$\rho_m$	Mittlere Dichte des Zweiphasengemisches	$kg/m^3$
$\tau$	Schubspannung	$N/m^2$
$\tau$	Zeitintervall	$s$
$\sigma$	Oberflächenspannung	$N/m$
$\phi$	Neigungswinkel	$Grad$

## Indizes

---

$A$	Anlage	–
$B$	Betriebszustand der Anlage bei maximalen Kreislauftemperaturen	–
$g ; l$	Gas- und Flüssigphase	–
$G$	Propylenglykol, Glattrohr	–
$H$	Hochpunkt	–
$K$	Kollektor, Hochpunkt Kollektorfeld	–
$i ; j ; k$	Laufvariable	–
$i$	Komponentenindex bei Gemischen	–
$lim$	Theoretische Grenze	–
$m$	Arithmetisches Mittel	–
$Rl ; Vl$	Rücklauf- und Vorlaufleitung	–
$R$	Referenzzustand der Anlage bei minimalen Kreislauftemperaturen	–
$opt$	Optimaler Wert	–
$ref$	Referenzzustand der Anlage	–
$S$	Zustand der Anlage bei Stagnation	–
$s$	Sättigungszustand	–
$SK$	Solarkreis	–
$\ddot{u}$	Überdruck zum Atmosphärendruck	–
$W$	Wasser	–

## Dimensionslose Kennzahlen

---

$Fr$	Froude-Zahl
$j_g^* ; j_l^*$	Wallis-Parameter für die Gas- und Flüssigphase
$Mo$	Morton-Zahl
$Re$	Reynolds-Zahl
$We$	Weber-Zahl

## 6.5 Sachverzeichnis

- Abblaseleistung, 104, 118  
 Ableseunsicherheit, 106  
 Absorberelement, 58  
 Absorberstreifen, 55  
 Absorptionsgrad, 189  
 Aerogel, 12  
 Anfangsdruck, 124, 125, 126, 255, 256, 258, 278  
 Anfangstemperatur, 243  
 Anlagenkennlinie, 88, 90  
 Anlegefühler, 27, 215  
 Ansprechdruck, 104, 105, 106, 116, 118, 125, 127, 128, 132, 133, 144, 204, 278  
 Atmosphärendruck, 84, 85, 86, 102, 108, 120, 124, 125, 127, 130, 131, 146, 170, 174, 177, 191, 198, 278, 281  
 Auffanggefäß, 116  
 Aufheizzeit, 254  
 Aufstellbar, 173  
 Aufstiegsgeschwindigkeit, 165, 167, 168  
 Auftrieb, 157, 161, 162, 175  
 Ausdehnungsleitung, 87, 98, 99, 110, 111, 112, 114, 118, 132, 144, 193, 246  
 Ausdehnungsvolumen, XIII, 97, 105, 120, 122, 124, 126, 127, 134  
 Ausknicken, 18, 22, 191  
 Austauschterm, 210  
 Axialkompensator, 19, 25, 26, 30  
 Bauschuttmatten, 6, 9  
 Befüllmethode, 169  
 Belüftungsöffnung, 4, 5  
 Bernoulli-Diffusor, 264, 265, 266  
 Bernoulligleichung, XIII, 31, 34, 36, 37, 46, 47, 61, 88, 265, 267  
 Bestrahlungsstärke, 1, 3, 14, 15, 77, 90, 199, 200, 211, 213, 216, 233, 276  
 Betriebssicherheit, VI, 1, 4, 26, 145, 189  
 Betriebstemperatur, 85, 86, 115, 146  
 Betriebszustand, XIV, 83, 84, 97, 103, 120, 121, 122, 129, 130, 131, 134, 136, 137, 145, 146, 281  
 Bewegungsgleichung, 33, 34, 261, 263  
 Bezugshöhe, 84, 85, 139  
 Biegeschenkel, 9, 17, 19, 20  
 Blasenströmung, 206, 207, 224  
 Blitzschutzkonzept, 14  
 Brauchwasser, 191  
 Brüstung, 9, 156  
 Bypass, 176, 177, 197  
 Carnot-Diffusor, 264, 265, 266, 267  
 CCFL, 226, 238  
 Charakteristische Länge, 161  
 C-Konfiguration, 56, 59  
 Closure laws, 210  
 Counter-current flow limitation, 226  
 Dacheindeckung, 10, 11, 14  
 Dachheizzentralen, 197  
 Dachneigung, 14, 214  
 Dampfbildung, 97, 132, 189, 190, 198, 199, 203, 213, 215, 222, 233, 241, 242, 245, 246, 255  
 Dampffront, 199, 246, 247, 248, 249, 250, 252, 253  
 Dampfmassenstrom, 234  
 Dampfproduktionsleistung, 200, 217, 277  
 Dampfsperre, XIII, 5, 13  
 Darcy-Weisbach, 35, 70, 93  
 Degradation, 152, 189, 190  
 Dehnungsausgleich, 21, 22, 23, 25  
 Dehnungskräfte, 9  
 Destillation, 211, 233  
 Diffusionsdicht, 16, 17, 101  
 Diffusionskoeffizienten, 101, 184  
 Diffusionsoffen, 14  
 Dissipationsvermögen, 201, 213, 221  
 Dominante Stränge, 67  
 Drain-Back, 98, 102, 103  
 Drift-Flux Modell, 210, 223, 224, 276  
 Druckausgleich, 4  
 Druckbeständigkeit, 18, 44  
 Druckbilanz, 222, 248  
 Druckenergie, 34, 265  
 Druckgewinn, 88, 265, 266  
 Druckhöhe, 171  
 Druckkräfte, 18, 25, 33, 263  
 Druckprüfgerät, 144  
 Druckschlauch, 171  
 Drucksensor, 146  
 Druckspitzen, 84  
 Drucksprung, 129

- Druckstoß, 191, 192, 203, 204, 248  
 Druckverlauf, 29, 31, 36, 83, 87, 88, 89,  
 123, 198, 199, 213  
 Druckverlustbeiwert, 35, 37, 45, 46, 266,  
 280  
 Druckverlustcharakteristik, 48  
 Druckzuschlag, 124, 125, 278  
 Durchflusskapazität, 48  
 Durchflussmesser, 28, 29, 47, 232  
 Einbindung, XI, 1, 97, 98, 110, 113, 118  
 Ejektorpumpen, 174  
 Elementarmasche, 61, 64, 67  
 Emissionsgrad, 189, 190  
 Enddruck, 124, 125, 126, 128, 278  
 Energiebilanz, 223, 233, 243, 249  
 Energiedichte, 34, 35, 266  
 Energiekonzept, 1  
 Entgaserkollektor, 178  
 Entgasung, XIV, 103, 125, 145, 149, 151,  
 169, 176, 177, 178, 181, 182, 187  
 Entgasungsgefäß, 177  
 Enthalpiestrom, 215, 216, 217, 243, 250  
 Entleerbarkeit, 55, 192, 198, 200, 201,  
 218, 237  
 Entleerhahnen, 157, 171, 173, 174  
 Entleerschlauch, 170, 171, 172, 173, 174,  
 175  
 Entlüftbarkeit, III, VI, XI, 6, 12, 18, 60,  
 87, 98, 169, 183, 247  
 Entlüftungsventil, 112, 154, 155, 156, 175,  
 177  
 EPDM-Schaum, 12  
 Erhaltungsgleichungen, III, XII, XIV, 204,  
 206, 208, 209, 262, 264  
 Estrich, 13  
 Eulergleichung, XIV, 31, 34, 261, 263,  
 264  
 Extremale Zustände, 130  
 Feldverrohrung, 4, 6, 7, 9, 10, 12, 13, 19,  
 60, 70, 74, 155, 156, 192, 194, 196,  
 212, 217  
 Festlager, 8, 9, 12, 19, 20, 25, 26  
 Flachdach, 6, 7, 30, 156  
 Fließgesetz, 35  
 Fluidelement, 33  
 Flüssigkeitssäule, 123, 124, 133, 175  
 Flüssigkeitsspiegel, 87, 170, 172, 174, 192  
 Flüssigkeitsverlust, 177  
 Flüssigphase, 177, 178, 183, 184, 199,  
 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 216,  
 222, 227, 234, 239, 247, 276, 277, 280,  
 281  
 Flüssigvolumenanteil, 205, 210, 237, 238,  
 239, 240, 280  
 Förderleistung, 83, 87, 102, 115, 170  
 Fördermedium, 84  
 Freie Gase, 27, 109, 114, 151, 153, 167,  
 176, 181, 183  
 Freie Oberfläche, 87, 102, 103  
 Froude-Zahl, 159, 161, 227, 281  
 Füllarmaturen, 169, 172  
 Fülldruck, 97, 102, 116, 118, 127, 128,  
 129, 136, 137, 138, 139, 140, 172, 175,  
 199  
 Füllpumpe, 144, 145, 169, 170, 171, 172,  
 174, 175  
 Füllzustand, 97, 117, 129, 138, 143  
 Funktionskontrolle, 26, 137, 143, 147  
 Funktionsprüfung, 105, 146  
 Fußventil, 170  
 Gasdruck, 98, 100, 107, 117, 119, 147,  
 148  
 Gasdurchlässigkeit, 101  
 Gasfüllventil, 99, 144  
 Gasgehalt, 87, 145  
 Gaslöslichkeit, 87, 177, 180, 267, 277  
 Gasmenge, 98, 100, 103, 107, 146  
 Gasphase, 87, 102, 103, 176, 179, 181,  
 183, 184, 185, 204, 205, 206, 207, 208,  
 209, 223, 224, 226, 227, 232, 239, 280  
 Gasvolumenanteil, 178, 205, 206, 207,  
 210, 222, 223, 224, 231, 232, 237, 238,  
 239, 240, 248, 280  
 Gegenstrombegrenzung, 222, 226, 227,  
 228, 229, 230, 231, 237, 238, 239, 240,  
 276, 277  
 Gehante Verbindungen, 17  
 Genauigkeitsklasse, XIV, 104, 105, 106  
 Geräuschbildung, 84  
 Gesamtenergie, 248  
 Geschwindigkeitsgradient, 45, 158  
 Gewindedichtungspasten, 17  
 Gleitlager, 8, 9, 19, 20, 25  
 Grenzflächenkräfte, 157  
 Haftreibung, 9, 17, 25  
 Halbmembran, 98, 111

- Handentlüfter, 7, 171  
 Hanging film intercept, 228  
 Harfe, 54  
 Hartlot, 17  
 Henry-Diagramm, 181  
 Henry-Koeffizienten, 180  
 Hochlinien, 155  
 Hochpunkt, 7, 90, 91, 103, 112, 114, 123, 124, 125, 127, 130, 131, 132, 133, 141, 154, 156, 159, 171, 172, 173, 175, 183, 198, 278, 281  
 Holdup, 205  
 Ideale Gemische, 183, 184  
 Impulsaustausch, 44, 207, 221, 254  
 Impulsstromdichte, 263, 264, 265  
 Inertgas, 99, 103  
 Innere Energie, 243, 279  
 Kappenventile, 111  
 Kavitation, 83, 84, 87, 103, 191  
 Kennlinienfeld, 82  
 Kiesschüttung, 6  
 kinetische Energiedichte, 34, 266  
 Klemmringverschraubungen, 17  
 Knoten, 53, 61, 62, 67, 208, 215, 241  
 Knotenmethode, 62  
 Knotensatz, 61, 63, 65, 67  
 Kollektorbefestigung, 9  
 Kollektorelement, 58, 59, 65, 67, 68, 80, 196  
 Kollektorfühler, XIII, 27  
 Kollektorleistung, 14, 233  
 Kollektormodell, 3  
 Kollektorreihe, 7, 8, 9, 58, 59, 60, 63, 65, 67, 70, 72, 73, 74, 77, 79, 80, 92, 155, 191, 217, 276  
 Kollektorstrang, 58, 59, 237, 240, 241  
 Kompressordruckhaltung, 18, 97, 98, 100, 101, 117, 118, 237, 248, 255, 256, 257, 258  
 Kondensation, 114, 115, 193, 204, 209, 210, 245, 246, 247, 250, 280  
 Kondensationsdruckstoß, 196, 203  
 Konterlatten, 10, 11, 12, 14  
 Kontinuitätsgleichung, 31, 32, 33, 261, 265  
 Kontrollvolumen, 32, 33, 248, 250, 261, 262, 263, 265  
 Konvergenzverhalten, 63  
 Konversionsfaktor, 3, 77, 280  
 Konzentrationsgefälle, 101, 177, 178  
 Korrosion, 39, 103, 153, 190  
 Korrosionsinhibitor, 103, 179, 181, 267  
 Kräftebilanz, 33  
 Kreislaufpumpen, 174  
 Krümmungsdurchmesser, 40, 41, 42, 43, 276  
 Kühler, 112, 118, 193, 197  
 Längenänderung, 19, 20  
 Laufrad, 83  
 Leerdrückbarkeit, 60, 118, 192, 193, 196, 197, 218, 223, 237  
 Leersieden, 199, 221, 235, 236, 243, 255  
 Leibniz-Theorem, 261  
 Leistungsbilanz, 14, 240  
 Leistungsmessung, 27, 28  
 Lift force, 158  
 Lokale Druckverluste, 35, 36, 45  
 Löslichkeit, 101, 103, 149, 179, 181, 183, 187  
 Löslichkeitskoeffizient, 180, 280  
 Lösungsdiffusion, 101  
 Lösungsmittel, 180  
 Lötverbindung, 50  
 Luftabscheider, 14, 91, 152, 154, 156, 157, 162, 168, 177, 178, 183  
 Luftaustausch, 4  
 Luftfeuchtigkeit, 4, 13, 14  
 Lufttasche, 157, 159, 161, 162, 163, 164, 165  
 Luftwechselrate, 5  
 Mäanderabsorber, 55, 65, 75, 77, 183, 194, 196, 212, 222, 237  
 Manometer, XIV, 29, 34, 88, 100, 104, 105, 106, 107, 117, 120, 127, 129, 139, 141, 143, 174, 175, 277  
 Masche, 61, 62  
 Maschenmethode, 62, 63, 65, 66, 67, 68  
 Maschensatz, 61, 64  
 Massenbilanz, 32, 243, 262  
 Mehrphasenströmung, 204  
 Membran, XIII, 29, 90, 97, 98, 99, 101, 111, 116, 117, 118, 119, 129, 144, 191, 212, 237, 248, 255  
 Membran-Druckausdehnungsgefäß, XIII, 29, 90, 97, 98, 99, 101, 118, 119, 212, 237, 248, 255



- membranlos, 98
- Membranwerkstoff, 101, 118
- Messunsicherheit, 104, 106
- Metallbalgkompensator, 44, 45, 65, 191
- Mikroblasen, 170, 172
- Minor losses, 36, 45
- Mischungsmodell, 210, 233, 247
- Monoton fallend, 193, 196
- Morton-Zahl, 162, 165, 281
- Nachdruckhaltung, 113, 114, 115, 124, 125, 127, 132, 193
- Nachspeisung, 100, 101, 116, 124, 129, 177
- Nassläuferpumpe, 81
- Neigungswinkel, 162, 164, 166, 208, 225, 226, 230, 281
- Nennbiegeradius, 22, 24
- Nennvolumen, 118, 126, 128, 129, 136, 137, 140, 141, 212, 279
- Nicht kondensierbar, 178
- Nodalisierung, 222
- Normalatmosphäre, 85
- Nutzschicht, 6
- Oberflächenspannung, 87, 124, 157, 160, 161, 162, 167, 168, 228, 229, 230, 273, 274, 281
- Öffnungsdruck, 48, 215, 217
- Öffnungsüberdruck, 104
- Oxidation, 102, 103, 152
- Parallel durchströmt, 50, 54, 196, 202, 231
- Parallelschaltung, 56, 57, 153
- Partialdruck, 87, 101, 103, 177, 178, 180, 181, 184, 278
- Partielle Stagnation, XIII, 27, 109, 151, 191
- Periodisches Rohrnetz, 70
- Permeabilität, 101, 144
- Pfad, 61
- Pfropfenströmung, 206, 207, 224
- Phasenanteil, 204
- Phasendiagramm, 185
- Phasengrenzfläche, 103, 178, 206, 209
- Planungsprozess, XIII, 1
- Plug-Flow, 228
- Plug-flow intercept, 228
- Potenzielle Energie, 34, 210, 248
- Pressfittings, 16, 17, 21, 103
- Puffergefäß, 110
- Pumpendruck, 81, 82, 88, 89, 114, 115, 125, 127, 132, 141, 173, 215, 278
- Pumpendruckhaltung, 97, 98, 101
- Pumpengruppe, 12, 171, 212
- Pumpenkennlinie, 81, 82, 83, 89, 90
- Querschnittserweiterung, 46, 265
- Querschnittsverengung, 46, 83
- Referenzhöhe, 86, 117
- Referenzpunkt, 87, 90, 111, 112, 113, 114, 124, 127, 132, 141, 193, 212, 278
- Referenztemperatur, 19, 20, 108, 121, 134, 135, 136, 138, 140, 141, 279
- Referenzzustand, 108, 120, 121, 124, 126, 127, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 141, 147, 281
- Reibungskraft, 35, 276
- Reservevolumen, 129, 130, 134, 135, 136, 138, 143, 144, 147, 279
- Restmenge, 198, 199, 200, 201, 218, 220, 221, 222, 223, 231, 232, 233, 234, 235, 237, 239, 240, 241, 246, 248, 249, 254, 255, 257, 258, 277
- Reynoldszahl, XIII, 31, 37, 38, 39, 41, 43, 44, 45, 50, 75, 161, 167, 225
- Ringwellschlauch, 168
- Rohrfedermanometer, 104
- Rohrreibungszahl, XIII, 35, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 44, 45, 71, 73, 75, 276, 280
- Rohrscheitel, 157
- Rohrwendel, 39, 40, 41, 43, 154, 276
- Rückschlagventil, 112, 113, 170, 173, 174, 175, 193, 198, 212, 215, 218
- Sanierungsplan, 9
- Sauerstoff, 101, 103, 149, 152, 181, 187
- Saugdruckhaltung, 113, 114, 115, 124, 125, 132, 193
- Saugkorb, 169
- Saugstutzen, 83, 131, 132, 170, 277, 278
- Schallgeschwindigkeit, 28
- Schlauchverbindung, 170
- Schließbedingung, 210
- Schließdruckdifferenz, 104, 116, 118, 125, 127, 128, 133, 278
- Schlupf, 206, 210, 223, 279
- Schneidringverschraubung, 17, 47
- Schornstein, 13, 14
- Schrägdach, 5, 60
- Schubspannung, 35, 281

- Schwallströmung, 206  
 Schweredruck, 34, 45, 123, 124, 128, 132, 133, 170, 175  
 Schwerkraft, 33, 164, 193, 221, 227, 263  
 Schwerkraftfundierung, 25  
 Schwimmerventil, 157  
 Sekundärströmung, 39  
 Selbstentlüftung, XIV, 15, 151, 152, 153, 157, 158, 160, 161, 162, 164, 167, 168, 169, 173, 176, 228  
 Sicherheitsgruppe, 104  
 Sicherheitsventil, 97, 98, 104, 105, 116, 118, 127, 132, 133, 191  
 Siedebetrieb, 178, 191  
 Siedetemperatur, 152, 178, 199, 200, 203, 211, 233, 237, 242, 243, 257, 272  
 Slip ratio, 206  
 Solarthermische Entgasung, 178  
 Sparren, 10, 13, 14  
 Spülvorgang, 174  
 Stagnationsereignis, 191, 199, 204, 213, 254  
 Stagnationsfall, 20, 55, 60, 97, 118, 259  
 Stagnationsleistung, 200  
 Stagnationstemperatur, 133, 189, 190, 233  
 Steigzone, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14  
 Stillstandsdruck, 135  
 Stoffmenge, 119, 277  
 Stoßverlust, 265, 266, 267  
 Strang, 61, 63, 71, 77, 277  
 Stromfaden, 31, 33  
 Stromlinie, 31  
 Stromtrennung, 49, 50, 51, 52  
 Strömungsblockaden, III, 109, 153  
 Strömungsdampfgehalt, 178, 223, 243, 280  
 Strömungsform, 37, 45, 165, 170, 206, 208, 224, 225, 228  
 Strömungsformenkarte, 208  
 Strömungsgasgehalt, 205, 223  
 Strömungsgeräusche, 14  
 Strömungsgeschwindigkeit, 31, 43, 61, 156, 157, 159, 176, 206, 207, 227, 261  
 Strömungsverteilung, XIII, 43, 54, 56, 60, 61, 62, 63, 67, 69, 73, 77, 79, 80, 92, 131, 153  
 Superficial velocity, 205  
 Systemdruck, 26, 98, 117, 143, 189, 191, 219  
 Taupunkt, 4  
 Teflon, 17  
 Teildruckzuschlag, 125, 129, 141, 278  
 Temperaturhub, 14, 15  
 Thermische Zustandsgleichung, 119  
 Thermohydraulische Simulation, 204  
 Tichelmann, 56, 59, 60, 63, 64, 67, 69, 76, 79, 94, 198  
 Tichelmannleitung, 59, 60, 80  
 Tiefpunkt, 103, 132, 169  
 Torsionsbelastung, 19, 21  
 Torsionsmoment, 22  
 Torsionsmomente, 21, 22, 23  
 TRACE, XIV, 208, 211, 214, 215, 220, 221, 222, 240, 241, 254, 255, 257  
 Trägheitskräfte, 161, 162, 164  
 Transporttheorem, XIV, 261, 262, 264  
 T-Stück, 8, 46, 47, 49, 50, 52, 154  
 Überströmventil, 98, 100, 101  
 Überströmversuch, 145, 146, 147  
 Umgebungsdruck, 103, 105, 141, 230  
 Umkehrdach, 6  
 Unstetigkeit, 37, 51  
 Unterdach, 5, 10, 11, 12, 13, 14  
 Unterdruck, 103, 144, 158, 170, 174, 177  
 Unterkonstruktion, 5, 9, 23  
 Unterspannbahn, 10, 11, 12  
 Vakuumdicht, 58, 103, 130, 144, 191  
 Vakuumentgasung, 87, 145, 151, 169, 177, 183  
 Vakuum-Röhrenkollektor, IV, XIV, 54, 57, 190  
 Verdrängungsphase, 221, 223, 228, 233, 237, 239, 241, 242, 243, 246, 250, 257  
 Verlustkoeffizient, 233, 241  
 Verlustleistung, 199, 201, 217, 243  
 Verzweigung, 51  
 Viskosität, 43, 66, 75, 83, 91, 160, 161, 167, 179, 225, 228, 269, 280  
 Void fraction, 205, 259  
 Vollmembran, 98, 99, 111, 112  
 Vollständiges Differential, 33  
 Volumenänderung, 120, 121, 122  
 Volumenkräfte, 263  
 Volumenstromdichte, 205, 206, 222, 223, 224, 225, 226, 231, 238, 239, 240, 277

- Volumenzunahme, 122, 135
- Vordruck, 98, 100, 107, 108, 125, 126, 128, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 144, 146, 212, 278
- Vordruckprüfung, 145
- Vordruckreserve, 140
- Vordruckverlust, 101
- Vorschaltgefäß, 110, 112, 115, 116, 118, 134, 193, 212, 213, 216, 218, 220, 257
- Wallis-Parameter, 227, 229, 231, 232, 238, 281
- Warmdach, 6
- Wärmedehnungen, XIII, 8, 9, 12, 18, 19, 72, 90
- Wärmedurchgangskoeffizient, 199
- Wärmeleitungsstruktur, 211, 214
- Wärmeverlustkoeffizient, 3
- Wartung, 4, 9, 10, 14, 100, 107, 121, 127, 144
- Wassersäule, 120
- Wasservorlage, 119, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 135, 136, 138, 144, 147, 278, 279
- Weber-Zahl, 162, 281
- Wechselsprung, 159, 239
- Weichlot, 17
- Wellschlauch, 22, 23
- Wendel, 39, 41, 43
- Wendeldurchmesser, 40
- Windlastsicherung, 5, 6
- Wirkungsgrad, 3, 4, 5, 15, 77, 80, 81, 190, 199, 211, 214, 220, 221, 233, 237, 255, 280
- Wirkungsgradkennlinie, 233, 279
- Zersetzungsprodukte, 152
- Zink, 17
- Z-Konfiguration, 56, 60
- Zuganker, 26
- Zulaufdruck, 83, 84, 85, 86, 87, 90, 103, 115, 131, 133, 191, 278
- Zweifluidmodell, 208, 209, 210
- Zweiphasenströmung, IV, 161, 162, 170, 172, 178, 191, 206, 223, 226, 228
- Zwischenphasenreibung, 14, 83, 102, 152, 178, 193, 196, 203, 206, 209, 210, 217, 221, 222, 226, 227, 228, 239, 257