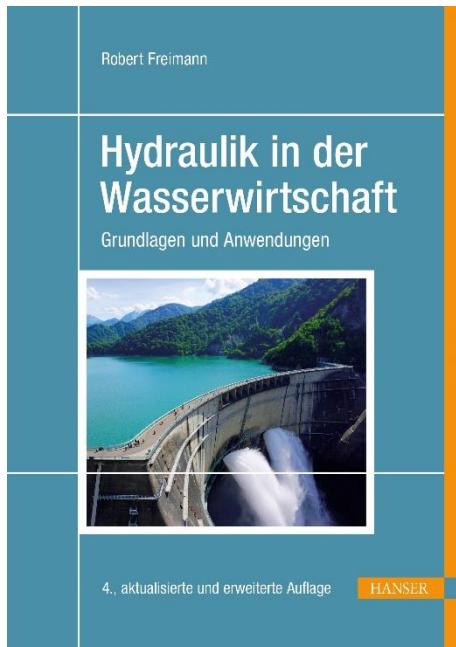


# HANSER



## Leseprobe

zu

# Hydraulik in der Wasserwirtschaft

von Robert Freimann

Print-ISBN 978-3-446-46088-1

E-Book-ISBN 978-3-446-46089-8

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446460881>  
sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Vorwort zur 4. Auflage

**Liebe Leserin, lieber Leser,**

die bisherigen Auflagen 1 bis 3 wurden von Ihnen sehr gut angenommen, vielen Dank dafür. Daher habe ich mich zusammen mit dem Carl Hanser Verlag entschieden, eine vierte Auflage herauszubringen. Wie Sie vielleicht bemerkt haben, geschieht dies unter etwas anderem Titel. Da der Nutzerkreis unserer Erfahrung nach deutlich über die Beteiligten des Bauingenieurwesens hinausgeht, lautet der Titel nun „Hydraulik in der Wasserwirtschaft“. Dies trägt dem Umstand Rechnung, dass hydraulische Erkenntnisse und Prinzipien beispielsweise auch von Hydrologen und Hydrologen, Agrar- und Umweltingenieurinnen und -ingenieuren, Landschafts- und Stadtplanerinnen und -planern sowie Vermessungsingenieurinnen und -ingenieuren in den jeweiligen Tätigkeitsbereichen genutzt und umgesetzt werden.

Mit diesem Buch wende ich mich an die gesamte Leserschaft, unabhängig vom Geschlecht und anderen Merkmalen. Keine Person soll weder bevorzugt noch benachteiligt werden. Bei direkter Ansprache verfahre ich wie im ersten Absatz bereits geschehen, möchte dabei aber ausdrücklich alle Personen geschlechtsneutral mit einbeziehen (w/m/d). Auf die in diesem Zusammenhang manchmal eingesetzten Sonderzeichen verzichte ich zugunsten einer guten Lesbarkeit bewusst.

Der Aufbau bleibt weitgehend gleich, ebenso der Inhalt. Hier und da wurde etwas korrigiert, ergänzt, verdeutlicht oder anders dargestellt. Dies alles erfolgt nicht zuletzt aufgrund der Anregungen seitens der Leserschaft, für die ich mich an dieser Stelle bedanken möchte. Unverändert sind die praxisgerechte Aufbereitung der hydraulischen Grundlagen sowie die durchgerechneten Beispiele und selbst zu lösen den Aufgaben mit detaillierten Lösungen. Auch die einschlägigen englischsprachigen Fachbegriffe werden beibehalten. Hinzugekommen sind Praxishinweise, die Ihnen weitere Informationen liefern können. Aus technischen Gründen nicht fortgeführt werden kann die App FREDDY, weshalb in diesem Buch auch kein Verweis oder QR-Code mehr zu finden ist.

Nach wie vor richtet sich dieses Buch in erster Linie an Studierende an Universitäten, Hochschulen und vergleichbaren Bildungseinrichtungen. Neben der Vermitt-

lung der im Studium erforderlichen Kenntnisse kann es aber auch der Praktikerin und dem Praktiker eine wertvolle Hilfe zur kurzfristigen Auffrischung von hydraulischen Inhalten sein. Der Stoff ist fundiert dargestellt, ohne dabei theoretische Her- und Ableitungen in den Vordergrund zu stellen.

Ich danke allen, die mir wieder mit Rat und Tat bei der Erstellung des Manuskriptes behilflich waren. Ein besonderer Dank geht an das Team um Frau Natalia Silakova und Frau Christina Kubiak vom Carl Hanser Verlag für die sehr gute, angenehme und geduldige Zusammenarbeit.

München, im September 2022

Robert Freimann

# Inhalt

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Vorwort zur 4. Auflage .....</b>                                       | <b>V</b>  |
| <b>1 Einführung und Grundlagen .....</b>                                  | <b>1</b>  |
| 1.1 Bedeutung der Hydraulik .....                                         | 1         |
| 1.2 Wichtige Eigenschaften von Wasser .....                               | 4         |
| 1.2.1 Dichte .....                                                        | 5         |
| 1.2.2 Viskosität oder Zähigkeit .....                                     | 7         |
| 1.2.3 Volumenelastizität .....                                            | 8         |
| 1.2.4 Schallgeschwindigkeit .....                                         | 8         |
| 1.2.5 Oberflächenspannung und Kapillarität .....                          | 9         |
| 1.2.6 Dampfdruck .....                                                    | 10        |
| 1.3 Höhensysteme und Transportmechanismen .....                           | 11        |
| 1.3.1 Höhensysteme .....                                                  | 11        |
| 1.3.2 Physikalische Transportmechanismen .....                            | 12        |
| 1.4 Englische Fachbegriffe zu Kapitel 1 .....                             | 14        |
| <b>2 Hydrostatik .....</b>                                                | <b>15</b> |
| 2.1 Flüssigkeitsdruck .....                                               | 15        |
| 2.1.1 Druckeinheiten .....                                                | 17        |
| 2.1.2 Bezugsdruck .....                                                   | 18        |
| 2.1.3 Kommunizierende Gefäße und Röhren .....                             | 20        |
| 2.2 Grundlegendes zum Druck auf Flächen .....                             | 23        |
| 2.3 Druck auf ebenen Flächen .....                                        | 25        |
| 2.4 Tabellarische Ermittlung der Druckkraft .....                         | 31        |
| 2.5 Druck auf gekrümmte und polygonartig zusammengesetzte Berandung ..... | 34        |

|          |                                                       |           |
|----------|-------------------------------------------------------|-----------|
| 2.6      | Auftrieb .....                                        | 37        |
| 2.7      | Hydrostatik in bewegten Behältern .....               | 41        |
| 2.7.1    | Vertikal beschleunigte Behälter .....                 | 41        |
| 2.7.2    | Horizontal beschleunigte Behälter .....               | 43        |
| 2.7.3    | Rotierende Behälter .....                             | 44        |
| 2.8      | Schwimmstabilität .....                               | 47        |
| 2.9      | Englische Fachbegriffe zu Kapitel 2 .....             | 49        |
| <b>3</b> | <b>Hydrodynamik .....</b>                             | <b>50</b> |
| 3.1      | Allgemeine Begriffe .....                             | 50        |
| 3.2      | Bewegungsarten von Flüssigkeiten .....                | 53        |
| 3.2.1    | Stationäre und instationäre Bewegung .....            | 53        |
| 3.2.2    | Gleichförmige und ungleichförmige Bewegung .....      | 54        |
| 3.2.3    | Kontinuierliche und diskontinuierliche Bewegung ..... | 54        |
| 3.2.4    | Beispiel zu den Bewegungsarten .....                  | 55        |
| 3.3      | Fließverhalten realer Flüssigkeiten .....             | 56        |
| 3.3.1    | Laminares und turbulentes Fließen .....               | 57        |
| 3.3.2    | Schubspannung .....                                   | 58        |
| 3.3.3    | Reynoldszahl .....                                    | 58        |
| 3.4      | Kontinuitätsbedingung .....                           | 60        |
| 3.5      | Energiegleichung von Bernoulli .....                  | 62        |
| 3.5.1    | Bernoulligleichung für ideale Flüssigkeiten .....     | 62        |
| 3.5.2    | Bernoulligleichung für reale Flüssigkeiten .....      | 68        |
| 3.5.3    | Messung und Beobachtung der Energieanteile .....      | 70        |
| 3.6      | Impulssatz .....                                      | 71        |
| 3.6.1    | Allgemeine Betrachtungen .....                        | 71        |
| 3.6.2    | Stützkraft bei Druckrohrleitungen .....               | 73        |
| 3.6.3    | Stützkraft bei Gerinneströmungen .....                | 77        |
| 3.6.4    | Stützkraft bei freien Strahlen .....                  | 79        |
| 3.7      | Potentialströmungen .....                             | 80        |
| 3.7.1    | Überblick .....                                       | 80        |
| 3.7.2    | Einfache Potentialströmungen .....                    | 83        |
| 3.8      | Englische Fachbegriffe zu Kapitel 3 .....             | 86        |

|          |                                     |            |
|----------|-------------------------------------|------------|
| <b>4</b> | <b>Rohrhydraulik</b>                | <b>88</b>  |
| 4.1      | Vorbemerkungen                      | 89         |
| 4.2      | Reibungsverluste                    | 90         |
| 4.2.1    | Ermittlungskonzept                  | 90         |
| 4.2.2    | Laminare Strömung                   | 91         |
| 4.2.3    | Turbulente Strömung                 | 91         |
| 4.2.4    | Nichtkreisförmige Querschnitte      | 98         |
| 4.3      | Einzelverluste                      | 99         |
| 4.3.1    | Grundlagen                          | 99         |
| 4.3.2    | Rohreinlauf                         | 100        |
| 4.3.3    | Querschnittsänderung                | 101        |
| 4.3.4    | Richtungsänderungen                 | 103        |
| 4.3.5    | Rohrtrennungen und -vereinigungen   | 104        |
| 4.3.6    | Armaturen                           | 106        |
| 4.3.7    | Rohrauslauf                         | 107        |
| 4.4      | Pumpen- und Turbinenleistung        | 109        |
| 4.5      | Zusammenfassung Energieplan         | 114        |
| 4.6      | Betriebliche bzw. integrale Rauheit | 117        |
| 4.7      | Englische Fachbegriffe zu Kapitel 4 | 123        |
| <b>5</b> | <b>Pumpenhydraulik</b>              | <b>125</b> |
| 5.1      | Pumpenarten                         | 125        |
| 5.1.1    | Unterscheidung nach Arbeitsprinzip  | 125        |
| 5.1.2    | Bauformen von Kreiselpumpen         | 126        |
| 5.2      | Charakteristik von Kreiselpumpen    | 127        |
| 5.2.1    | Pumpenkennlinie                     | 127        |
| 5.2.2    | Anlagenkennlinie                    | 128        |
| 5.2.3    | Betriebspunkt                       | 129        |
| 5.3      | Kombination von Kreiselpumpen       | 132        |
| 5.4      | NPSH-Berechnung                     | 135        |
| 5.5      | Englische Fachbegriffe zu Kapitel 5 | 140        |

|          |                                                 |            |
|----------|-------------------------------------------------|------------|
| <b>6</b> | <b>Gerinnehydraulik</b>                         | <b>141</b> |
| 6.1      | Allgemeine Beziehungen                          | 143        |
| 6.2      | Strömen und Schießen                            | 147        |
| 6.3      | Gleichförmige Strömung                          | 150        |
| 6.3.1    | Fließformel nach Darcy-Weisbach                 | 151        |
| 6.3.2    | Fließformel nach Gauckler-Manning-Strickler     | 152        |
| 6.3.3    | Normalabfluss                                   | 154        |
| 6.4      | Grenzverhältnisse                               | 157        |
| 6.5      | Fließwechsel                                    | 160        |
| 6.5.1    | Vom strömenden zum schießenden Abfluss          | 160        |
| 6.5.2    | Vom schießenden zum strömenden Abfluss          | 161        |
| 6.5.3    | Wechselsprung                                   | 162        |
| 6.5.4    | Tosbecken                                       | 164        |
| 6.6      | Ungleichförmige Strömung                        | 164        |
| 6.6.1    | Ohne Fließwechsel                               | 165        |
| 6.6.2    | Mit Fließwechsel                                | 168        |
| 6.7      | Querschnittsänderungen                          | 169        |
| 6.7.1    | Querschnittserweiterung                         | 169        |
| 6.7.2    | Querschnittsverringerung                        | 172        |
| 6.7.3    | Lokale Verluste bei Querschnittsverringerung    | 176        |
| 6.8      | Wasserspiegellinienberechnung                   | 179        |
| 6.8.1    | Allgemeine Zusammenhänge                        | 179        |
| 6.8.2    | Hydraulische Kontrollquerschnitte               | 181        |
| 6.8.3    | Vorgabe einer Abschnittslänge $\Delta x$        | 182        |
| 6.8.4    | Vorgabe einer Wasserspiegeldifferenz $\Delta h$ | 184        |
| 6.9      | Abfluss in natürlichen Fließgewässern           | 186        |
| 6.9.1    | Unterschiedliche Rauheiten im Querschnitt       | 186        |
| 6.9.2    | Gegliederte Fließquerschnitte                   | 188        |
| 6.9.3    | Querschnitte mit Großbewuchs                    | 190        |
| 6.10     | Englische Fachbegriffe zu Kapitel 6             | 191        |

|                                                |            |
|------------------------------------------------|------------|
| <b>7 Ausfluss und Überfall .....</b>           | <b>193</b> |
| 7.1 Allgemeines .....                          | 193        |
| 7.2 Ausfluss aus Bodenöffnungen .....          | 195        |
| 7.3 Ausfluss aus Seitenöffnungen .....         | 198        |
| 7.3.1 Ausfluss aus großer Öffnung .....        | 199        |
| 7.3.2 Ausfluss aus kleiner Öffnung .....       | 200        |
| 7.3.3 Ausfluss unter Gegendruck .....          | 201        |
| 7.4 Ausfluss unter Planschütz .....            | 201        |
| 7.4.1 Freier Ausfluss .....                    | 202        |
| 7.4.2 Rückgestauter Ausfluss .....             | 204        |
| 7.5 Abfluss über Wehre .....                   | 207        |
| 7.5.1 Bezeichnungen und Einteilungen .....     | 208        |
| 7.5.2 Abflussberechnung .....                  | 210        |
| 7.5.3 Unvollkommener Überfall .....            | 212        |
| 7.6 Abfluss über Streichwehre .....            | 215        |
| 7.7 Abfluss über Tiroler Wehre .....           | 219        |
| 7.8 Instationärer Beckenausfluss .....         | 222        |
| 7.8.1 Freier Ausfluss .....                    | 222        |
| 7.8.2 Ausfluss unter Gegendruck .....          | 226        |
| 7.9 Englische Fachbegriffe zu Kapitel 7 .....  | 228        |
| <b>8 Sickerströmungen .....</b>                | <b>230</b> |
| 8.1 Grundlagen .....                           | 231        |
| 8.2 Druckhöhen und Standrohrspiegelhöhen ..... | 234        |
| 8.3 Anwendung von Potentialliniennetzen .....  | 235        |
| 8.3.1 Unterströmung von Bauwerken .....        | 237        |
| 8.3.2 Dammdurchsickerung .....                 | 239        |
| 8.4 Anströmung von Brunnen und Gräben .....    | 241        |
| 8.4.1 Vertikaler Brunnen .....                 | 242        |
| 8.4.2 Entwässerungsgraben .....                | 245        |
| 8.5 Englische Fachbegriffe zu Kapitel 8 .....  | 246        |

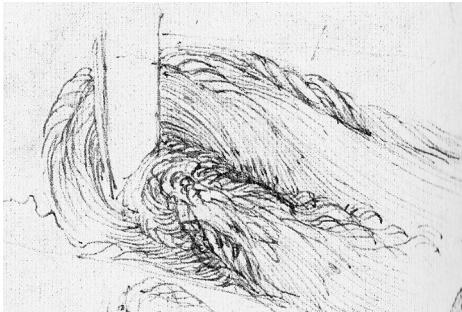
|                  |                                         |            |
|------------------|-----------------------------------------|------------|
| <b>9</b>         | <b>Ergänzende Themen</b>                | <b>247</b> |
| 9.1              | Berechnung von Rohrnetzen               | 247        |
| 9.1.1            | Rohrsysteme                             | 247        |
| 9.1.2            | Berechnung von Ringnetzen               | 249        |
| 9.2              | Druckstoß                               | 254        |
| 9.2.1            | Veranschaulichung der Problematik       | 254        |
| 9.2.2            | Schnelles Schließen am Rohrleitungsende | 256        |
| 9.2.3            | Langsames Schließen am Rohrleitungsende | 261        |
| 9.2.4            | Weitere Ursachen für Druckstöße         | 261        |
| 9.3              | Schwall und Sunk                        | 262        |
| 9.4              | Berechnung von Wasserspeichern          | 264        |
| 9.4.1            | Grundlagen                              | 265        |
| 9.4.2            | Retentionsraum                          | 266        |
| 9.4.3            | Trinkwasserspeicher                     | 269        |
| 9.5              | Englische Fachbegriffe zu Kapitel 9     | 272        |
| <b>10</b>        | <b>Lösungen</b>                         | <b>273</b> |
| 10.1             | Lösungen zu Aufgaben in Kapitel 1       | 273        |
| 10.2             | Lösungen zu Aufgaben in Kapitel 2       | 275        |
| 10.3             | Lösungen zu Aufgaben in Kapitel 3       | 285        |
| 10.4             | Lösungen zu Aufgaben in Kapitel 4       | 289        |
| 10.5             | Lösungen zu Aufgaben in Kapitel 5       | 295        |
| 10.6             | Lösungen zu Aufgaben in Kapitel 6       | 299        |
| 10.7             | Lösungen zu Aufgaben in Kapitel 7       | 309        |
| 10.8             | Lösungen zu Aufgaben in Kapitel 8       | 316        |
| 10.9             | Lösungen zu Aufgaben in Kapitel 9       | 318        |
| <b>Literatur</b> |                                         | <b>323</b> |
| <b>Index</b>     |                                         | <b>325</b> |

## ■ 1.1 Bedeutung der Hydraulik

Keine andere technische Disziplin ist derart eng mit der Entwicklung der Zivilisation verknüpft wie das Bauingenieurwesen. In den vor Jahrtausenden gewachsenen städtischen Hochkulturen errichteten die damaligen Techniker vor allem Stadtmauern, Sakral- und Repräsentationsbauten sowie Anlagen der Wasserwirtschaft. Es entstanden Bauwerke zur Wasserversorgung, zur Entwässerung und zum Schutz vor Wasser. Zudem war in den Regionen zwischen Euphrat und Tigris, am Nil oder am Indus Landwirtschaft nur mithilfe von künstlicher Bewässerung möglich. Unsere heutige Zivilisation ist ohne Hochwasserschutzmaßnahmen, ohne Wasserversorgung und Abwasserentsorgung, ohne Wasserkraftanlagen, ohne Hafenbauten nicht vorstellbar. Auch Anlagen zur Entwässerung von Straßen und Bahnen, der Wasserhaltung im Tiefbau, Brücken und Tunnelanlagen bedürfen der Beherrschung und des sachgerechten Umgangs mit Wasser.

### **Geschichtlicher Abriss**

Beschreibungen und Untersuchungen zum Verhalten des Wassers gehören zu den frühesten Wissenschaftsbereichen, hierbei sind die beiden Universalgenies ARCHIMEDES VON SYRAKUS (um 285 – 212 v.Chr.) und LEONARDO DA VINCI (1452 – 1519) hervorzuheben. Auf ARCHIMEDES ist unter anderem die Entdeckung des Prinzips des hydrostatischen Auftriebs zurückzuführen (siehe Abschnitt 2.6), während LEONARDO mit umfangreichen Skizzen, Studien und Konstruktionsideen die empirische Strömungslehre mitbegründete (Bild 1.1).

**Bild 1.1**

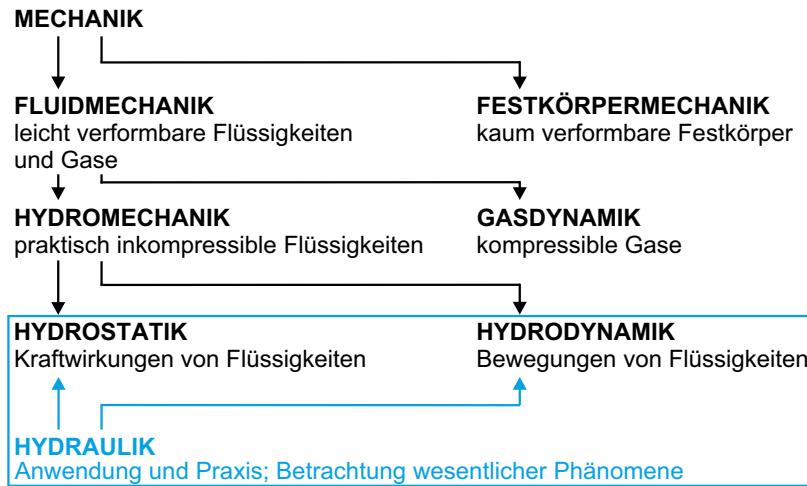
Skizze der Umströmung eines Zylinders  
(aus: Leonardo da Vinci – Das Wasserbuch,  
Verlag Schirmer/Mosel, München 1996)

Bei den Untersuchungen der klassischen Hydromechanik (vor allem D. BERNOULLI, 1700 – 1782, Mathematiker, Physiker und Mediziner, und L. EULER, 1707 – 1783, Mathematiker und Physiker) erfolgte zunächst eine starke Ausrichtung an der Mathematik. Dabei wurden Erkenntnisse für das ideale Fluid, das als inkompressibel und reibungsfrei betrachtet wurde, gewonnen. Insbesondere die Annahme der Reibungsfreiheit erwies sich allerdings als wenig praktikabel. Durch Einführung von Reibungsansätzen (vor allem C. L. M. H. NAVIER, 1785 – 1836, Physiker) sowie durch zweckmäßige Vereinfachungen in den mathematisch-physikalischen Ansätzen wurden Berechnungsmöglichkeiten geschaffen, die eine mathematisch-physikalische Ausgangsbasis haben, zudem aber für die praktische Anwendung geeignet sind. Diese Vereinfachungen werden in der Hydraulik durch experimentell ermittelte, also empirische Beiwerte berücksichtigt.

### Technische Abgrenzungen

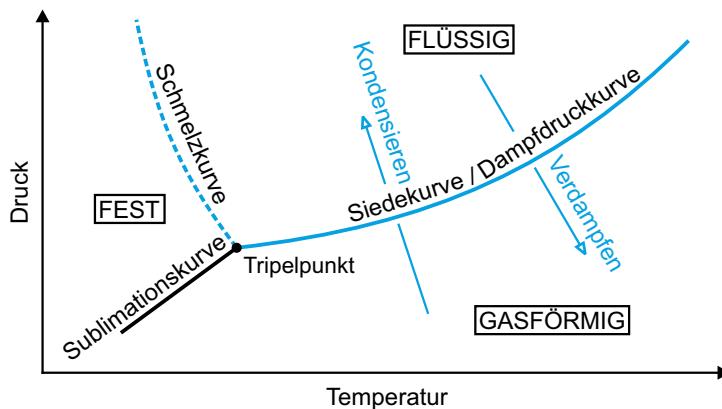
Die Wirkungen und Einflüsse von ruhendem oder sich bewegendem Wasser auf die natürliche Umwelt, den vom Menschen genutzten Lebensraum und auf entsprechende Bauwerke erfordern fundierte Kenntnisse von der Hydraulik des Wassers. Die Beschäftigung mit Hydraulik wiederum setzt Wissen und Fähigkeiten in Technischer Mechanik und Mathematik voraus. Bild 1.2 zeigt die Einteilung der Hydraulik in der Mechanik.

Die drei möglichen Aggregatzustände von Wasser werden gemäß Bild 1.2 in der Festkörpermechanik (Eis), in der Gasdynamik (Dampf) sowie in der Hydromechanik (Wasser) bearbeitet. Letztere wird in der praxisorientierten „Version“ als **Hydraulik** bezeichnet, manchmal auch als „Technische Hydraulik“ oder „Technische Hydromechanik“. Man versteht darunter die Lehre und technische Anwendung vom Gleichgewicht ruhender, inkompressibler Flüssigkeiten bei Einwirkung äußerer Kräfte (Hydrostatik) und von der Bewegung inkompressibler Flüssigkeiten in Rohren, Gerinnen und porösen Stoffen (Hydrodynamik).



**Bild 1.2** Hydraulik als Teilgebiet der Mechanik

Die Zustandsgrößen Druck und Temperatur entscheiden über den Aggregatzustand von Wasser (Bild 1.3). Der Phasenübergang fest – flüssig ist allgemein im Bauwesen wegen den damit verbundenen Volumenänderungen von Eis gegenüber flüssigem Wasser von Bedeutung (siehe Abschnitt 1.2.1). In der Hydraulik spielt die Zustandsänderung flüssig – gasförmig bei großen Geschwindigkeitsänderungen eine Rolle, darauf wird in diesem Buch aber nur durch Erläuterung der praktischen Auswirkungen eingegangen (Stichwort: Druckstoß, siehe Abschnitt 9.2). Der Übergang von der festen in die gasförmige Phase ist bei wasserwirtschaftlichen Aufgabenstellungen unerheblich. Am Tripelpunkt beträgt die Temperatur 0 °C, der Dampfdruck 0,6 kN/m<sup>2</sup> und die Dichte von Wasser 999,8 kg/m<sup>3</sup>.



**Bild 1.3** Aggregatzustände und deren Übergänge

### **Wesentliche Berufsfelder**

Die Hydraulik bildet die physikalische Grundlage für die Wasserwirtschaft, mit den Teilgebieten Wasserbau und Siedlungswasserwirtschaft. Neben der Entwicklung, Berechnung und Simulation (Stichwort: Computational Fluid Dynamics – kurz CFD) waren und sind Beobachtungen und Messungen in Feld- und Laborversuchen eine wesentliche Basis der Hydraulik. Die Hauptanwendungen liegen in der Ermittlung von Kräften auf Wasserbauwerke und den Strömungsgeschehnissen in Uferbereichen, in der Erfassung und Beschreibung von Strömungsbewegungen in Behältern, Rohren, Kanälen, Bächen und Flüssen, in der Berechnung von Überflutungsvorgängen auf Straßen und Plätzen, sowie in der Bearbeitung von Grundwasser- und Sickerströmungen.

Neben den oben schon erwähnten Bauingenieurinnen und Bauingenieuren werden hydraulische Erkenntnisse und Prinzipien beispielsweise auch von Hydrologen und Hydrologen, Agrar- und Umweltingenieuren und -ingenieuren, Landschafts- und Stadtplanerinnen und -planern sowie Vermessungsingenieurinnen und -ingenieuren in den jeweiligen Tätigkeitsbereichen genutzt und umgesetzt. Daher ist dieses Buch mit „Hydraulik in der Wasserwirtschaft“ betitelt.

Im Umfeld der im vorliegenden Buch angesprochenen Arbeitsbereiche und Berufsfelder kommt der eigentlich präzisierende Begriff der „Wasser-Hydraulik“ praktisch nicht vor, obwohl im landläufigen Sinne hydraulische Antriebe von Arbeitsmaschinen ebenfalls unter der Bezeichnung „Hydraulik“ bekannt sind. Im Zusammenhang mit den Arbeitsmaschinen wird manchmal auch der Begriff der „Öl-Hydraulik“ verwendet, da vor allem Öle als Kraftübertragungsmedien eingesetzt werden.

## **■ 1.2 Wichtige Eigenschaften von Wasser**

Denkt man an eine Flüssigkeit, dann kommt einem zumeist Wasser oder anderes trinkbares Nass in den Sinn. Beim heftigen Schütteln eines mit Wasser gefüllten Glases schwappt es über oder verspritzt gar. Gilt das für alle Flüssigkeiten? Haben alle Flüssigkeiten gleiche oder zumindest ähnliche Eigenschaften? Denken Sie an ein Glas Honig: Passiert beim Schütteln dasselbe wie mit Wasser? Verspritzt Honig oder schwappt er über den Rand? Allein beim Anheben zweier gleich großer Gläser, eines mit Wasser und das andere mit Honig gefüllt, spürt man die unterschiedliche Gewichtskraft der Flüssigkeiten. Das voneinander abweichende Verhalten verschiedener Flüssigkeiten kann mit den jeweiligen Eigenschaften erklärt werden.

### 1.2.1 Dichte

Für einen homogenen Stoff ist die Dichte  $\rho$  der Quotient aus der Masse  $m$  und dem Volumen  $V$ :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{in } \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ oder } \frac{\text{t}}{\text{m}^2} \quad (1.1)$$

Die Dichte des Wassers ist abhängig

- vom Salz- und Feststoffgehalt (siehe Tabelle 1.1),
- vom Druck (siehe Tabelle 1.2), und
- von der Temperatur (siehe Tabelle 1.2).

**Tabelle 1.1** Zur Dichte  $\rho$  von Wasser

| Medium                                       | $\rho$ in $\text{kg}/\text{m}^3$ |
|----------------------------------------------|----------------------------------|
| Reines Wasser bei 30 °C                      | 996                              |
| Reines Wasser bei 4 °C (Dichtemaximum)       | 1000                             |
| Ostseewasser mit ca. 0,8 % Salzgehalt        | 1006                             |
| Nordseewasser mit ca. 3,5 % Salzgehalt       | 1025                             |
| Mittelmeerwasser mit ca. 3,7 % Salzgehalt    | 1027                             |
| Wasser im Toten Meer mit ca. 28 % Salzgehalt | 1240                             |
| Flusswasser mit hohem Schwebstoffgehalt      | bis etwa 1100 möglich            |

Die geringste Auswirkung auf die Dichte von Wasser haben Druckänderungen, daher kann Wasser als inkompressibel angesehen werden. Dagegen ist die Temperaturabhängigkeit (siehe Tabelle 1.2) für einige Aufgabenstellungen nicht zu vernachlässigen. Für praktische Berechnungen mit Wassertemperaturen im Bereich bis 20 °C wird in der Regel ohne gravierende Genauigkeitseinbußen der Wert  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  angesetzt.

Multipliziert man die Dichte  $\rho$  mit der für hydraulische Betrachtungen zumeist ausreichend genauen Erdbeschleunigung von  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ , so erhält man das spezifische Gewicht  $\gamma$ , eine in der Hydraulik häufig benötigte Größe. Mit Wasser ergibt sich dafür der Wert  $9810 \text{ N/m}^3$  bzw.  $9,81 \text{ kN/m}^3$ .

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (1.2)$$

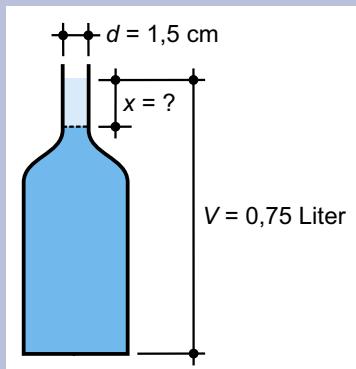
**Tabelle 1.2** Eigenschaften wichtiger Stoffe in der Hydraulik bei normalem Luftdruck (die gebräuchlichsten Größen für Wasser sind **fett** markiert)

| Stoff         | Temperatur<br>$T$ in °C | Dichte<br>$\rho$ in kg/m³ | Kinematische<br>Viskosität<br>$\nu$ in m²/s | Elastizitäts-<br>modul<br>$E$ in N/m² |
|---------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------|
| Eis           | -20                     | 920,2                     |                                             |                                       |
|               | -10                     | 918,6                     |                                             |                                       |
|               | 0                       | 916,7                     |                                             |                                       |
| Reines Wasser | 0                       | 999,8                     | $1,79 \cdot 10^{-6}$                        | ca. $2,1 \cdot 10^9$                  |
|               | 4                       | <b>1000</b>               | $1,57 \cdot 10^{-6}$                        |                                       |
|               | <b>10</b>               | 999,7                     | <b><math>1,31 \cdot 10^{-6}</math></b>      |                                       |
|               | <b>20</b>               | 998,2                     | <b><math>1,01 \cdot 10^{-6}</math></b>      |                                       |
|               | 30                      | 995,7                     | $0,80 \cdot 10^{-6}$                        |                                       |
|               | 40                      | 992,2                     | $0,66 \cdot 10^{-6}$                        |                                       |
|               | 50                      | 988,1                     | $0,56 \cdot 10^{-6}$                        |                                       |
| Luft          | 0                       | 1,29                      | $13,3 \cdot 10^{-6}$                        | ca. $1,5 \cdot 10^5$                  |
|               | 10                      | 1,25                      | $14,2 \cdot 10^{-6}$                        |                                       |
|               | 20                      | 1,20                      | $15,1 \cdot 10^{-6}$                        |                                       |



### Aufgabe 1.1

Eine Flasche ist mit einem 3/4 Liter Wasser mit der Temperatur  $T_1 = 40$  °C gefüllt. Um welches Maß  $x$  sinkt der Wasserspiegel im Flaschenhals ab, wenn das Wasser auf  $T_2 = 10$  °C abgekühlt wird? (Diese Aufgabe kann mithilfe eines Kühlschranks nachvollzogen werden.)





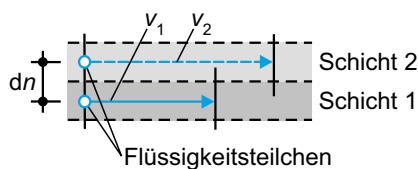
### Praxishinweis

Eis schwimmt, da es eine geringere Dichte hat, auf dem Wasser; das ist bekannt. Aber warum gibt es diesen Dichteunterschied (siehe Tabelle 1.2)? Normalerweise hat ein Feststoff eine größere Dichte als sein flüssiger Aggregatzustand. Bei Wasser und Eis ist es genau umgekehrt, da die einzelnen Wasserteilchen bei Eis einen größeren Abstand zueinander haben als im flüssigen Zustand. Im festen Zustand liegen die Wassermoleküle in einem geordneten Gitter vor, bei flüssigem Wasser sind sie beweglich, ungeordnet und rücken näher zusammen. Beim Gefrieren von Wasser zu Eis wird das Volumen daher größer und die Dichte geringer, der Volumenunterschied beträgt dabei etwa 9 %. Dringt Wasser über Kapillare und Risse in Beton oder Fahrbahndecken ein und gefriert bei Frost zu Eis, so kann durch die damit verbundene Volumenausdehnung die Baustoffstruktur geschädigt werden. So können aus Beton Stücke „herausgesprengt“ werden oder Schlaglöcher in Straßendecken entstehen.

## 1.2.2 Viskosität oder Zähigkeit

Die Viskosität (Zähigkeit) macht sich erst bemerkbar, wenn sich eine Flüssigkeit in Bewegung befindet. Ursache sind Geschwindigkeitsunterschiede zwischen benachbarten Flüssigkeitsteilchen, die Viskosität ist also ein Maß für die innere Reibung einer Flüssigkeit. Nach I. NEWTON (1643 – 1727, Mathematiker und Physiker) gilt für die dadurch hervorgerufene Schubspannung  $\tau$  folgende Gleichung mit den Bezeichnungen gemäß Bild 1.4:

$$\tau = \eta \cdot \frac{v_2 - v_1}{dn} = \eta \cdot \frac{dv}{dn} \quad (1.3)$$



**Bild 1.4**

Schubspannung und Viskosität

Die Schubspannung  $\tau$  in  $\text{N/m}^2$  ist also zum Geschwindigkeitsgefälle  $dv/dn$  proportional. Dies gilt für fast alle tropfbaren Flüssigkeiten. Der dazugehörige Proportionalitätsfaktor  $\eta$  wird als dynamische Viskosität bezeichnet und hat die Einheit  $\text{Ns/m}^2$ . Auf die Dichte bezogen, ergibt sich die in der Praxis verwendete kinematische Viskosität  $\nu$  in  $\text{m}^2/\text{s}$  zu

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1.4)$$

Dynamische und kinematische Viskosität sind von der Flüssigkeitstemperatur abhängig (siehe Tabelle 1.2). Die Abhängigkeit der Viskosität des Wassers vom Druck kann dagegen vernachlässigt werden. Die kinematische Viskosität  $\nu$  ist vor allem für die Berechnung der Reibungsverluste in Rohrleitungen und Gerinnen von Bedeutung.

### 1.2.3 Volumenelastizität

Die Volumenänderung  $\Delta V$  des Wassers bei Druckänderung  $\Delta p$  errechnet sich analog dem Hookschen Gesetz der Mechanik zu

$$\Delta p = -E_w \cdot \frac{\Delta V}{V} \quad \text{oder} \quad \Delta V = -V \cdot \frac{\Delta p}{E_w} \quad (1.5)$$

Darin bedeuten  $\Delta p$  die Druckänderung in  $\text{N/m}^2$ ,  $\Delta V$  die Volumenänderung in  $\text{m}^3$ ,  $V$  ist das ursprüngliche Volumen in  $\text{m}^3$  und  $E_w$  gibt den Elastizitätsmodul der Flüssigkeit in  $\text{N/m}^2$  wieder. Der Elastizitätsmodul von Wasser ist mit etwa  $E_w = 2,1 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$  (siehe Tabelle 1.2) rund 100-mal geringer als der von Stahl, Luft ist etwa 10 000-fach kompressibler als Wasser.

Die Elastizität wird vor allem bei gespanntem Grundwasser und zur Berechnung der Laufgeschwindigkeit von Druckwellen (Stichwort: Druckstoß, siehe Abschnitt 9.2) benötigt.



#### Aufgabe 1.2

Aus welchem Grund enthält Formel 1.5 das Minuszeichen?

### 1.2.4 Schallgeschwindigkeit

Störungen in einer Flüssigkeit breiten sich als Druckwellen mit der Schallgeschwindigkeit  $a_0$  aus. Diese auch als Störungsausbreitungsgeschwindigkeit, Druckfortpflanzungsgeschwindigkeit oder Druckwellengeschwindigkeit bezeichnete Größe (jeweils in  $\text{m/s}$ ) berechnet sich mit dem Elastizitätsmodul  $E$  und der Dichte  $\rho$  wie folgt:

$$a_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1.6)$$

Dieser Zusammenhang gilt nur für reine Flüssigkeiten ohne Einschluss von Gasblasen. Werden Gasblasen in einer Flüssigkeitsströmung mitgeführt, dann verringert sich die Schallgeschwindigkeit gegenüber dem Ansatz mit Formel 1.6, da Gasblasen aufgrund ihrer Kompressibilität die Übertragung von Druckschwankungen dämpfen. Die Rohrleitungsart nach Material und Einbausituation wirkt sich ebenfalls verringernd auf die Druckwellengeschwindigkeit aus.



### Aufgabe 1.3

Berechnen Sie unter Zuhilfenahme von Tabelle 1.2 die typischen Größenordnungen der Schallgeschwindigkeit für Wasser und Luft.

## 1.2.5 Oberflächenspannung und Kapillarität

Beim Übergang zwischen zwei verschiedenen Flüssigkeiten (z. B. Wasser/Öl) oder zwischen einer Flüssigkeit und einem Gas (z. B. Wasser/Luft) treten aufgrund der Anziehungskräfte zwischen den verschiedenartigen Molekülen die Oberflächenspannungen  $\sigma$  in N/m auf:

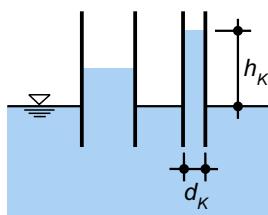
$$\sigma = \frac{\text{Arbeit}}{\text{Fläche}} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Länge}} \quad (1.7)$$



### Aufgabe 1.4

Überlegen Sie sich Beispiele aus Freizeit, Umwelt oder Alltag, in denen die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten eine wesentliche Rolle spielt.

Von praktischer Bedeutung ist die Oberflächenspannung für die kapillare Steighöhe  $h_K$  in runden Kapillaren mit dem Durchmesser  $d_K$  (Bild 1.5), vor allem im Zusammenhang mit der Grundwasserhydraulik. Die Kapillarwirkung ist die Ursache für das Aufsteigen von Wasser in porösen Medien entgegen der Erdanziehung, z. B. in den feinen Porenräumen des Untergrundes.



**Bild 1.5**  
Kapillare Steighöhe

Gebräuchliche Werte der Oberflächenspannung sind für die Grenzfläche Wasser/Luft  $\sigma = 0,073 \text{ N/m}$  bei  $20^\circ\text{C}$  und für den Grenzbereich Wasser/Öl  $\sigma = 0,02 \text{ N/m}$ . Berechnet wird die kapillare Steighöhe mit

$$h_k = \frac{4 \cdot \sigma}{\rho g \cdot d_k} \quad (1.8)$$

Es ist zu erkennen, dass sich die Steighöhe  $h_k$  umgekehrt proportional zum Durchmesser  $d_k$  verhält.



### Aufgabe 1.5

Berechnen Sie die kapillare Steighöhe von Wasser in einem Röhrchen mit dem Durchmesser  $d = 4 \text{ mm}$ .



### Praxishinweis

Wegen des kapillaren Aufstiegs von Untergrundfeuchte müssen Bodenplatten und Wände von Bauwerken z. B. durch Bitumenbahnen und -anstriche abgedichtet werden, Frostschäden an Straßendecken werden durch grobkörnige (und daher kapillarbrechende) Schichten verhindert. Bei kiesigem Untergrund liegt die kapillare Steighöhe im Bereich von einigen Millimetern bis wenigen Zentimetern, bei feinem Sand können mehrere Dezimeter erreicht werden, bindiges Material wie Schluff und Ton kann einen Feuchteaufstieg bis zu mehreren Metern bewirken.

## 1.2.6 Dampfdruck

Wasser siedet bei einem bestimmten Druck und scheidet unter Hohlraumbildung Gasblasen aus. Dieser Dampfdruck  $p_d$  ist temperaturabhängig. Bei  $100^\circ\text{C}$  ist er gleich dem Standardatmosphärendruck (Luftdruck)  $p_a = 101,3 \text{ kN/m}^2$ , bei der Verdampfung geht das Wasser von der flüssigen in die gasförmige Phase über. Wasser mit der Temperatur von  $10^\circ\text{C}$  verdampft bei einem absoluten Druck von  $1,25 \text{ kN/m}^2$ , also bei einem um  $100 \text{ kN/m}^2$  unter dem normalen Luftdruck liegenden Unterdruck. Bei  $20^\circ\text{C}$  beträgt  $p_d = 2,34 \text{ kN/m}^2$ . Weitere Informationen zum Dampfdruck finden sich in Beispiel 5.3 in Kapitel 5.

Starke Druckabsenkungen in Saug- und Heberleitungen können zum sogenannten „Abreißen“ der Wassersäule mit fallweise erheblichen Schäden führen. Dieser Vorgang wird allgemein mit dem Begriff „Kavitation“ (Hohlraumbildung) bezeichnet. Durch gelöste Gase, Inhaltsstoffe oder Temperatureinflüsse erfolgt die Verdampfung nicht erst mit ca.  $100 \text{ kN/m}^2$  Unterdruck (wie oben beschrieben), sondern bereits bei  $70$  bis  $80 \text{ kN/m}^2$ .

# Index

## A

- Abfluss 52
  - über Wehre 207
- Advektion 12
- Aggregatzustand 3
- Anlagenkennlinie 128, 297
- äquivalente Sandrauheit 93, 96
- Atmosphärendruck 10, 17
- Auftrieb 37
- Ausfluss aus Behältern 193
  - mit Bodenöffnung 195
  - mit großer Öffnung 199
  - mit kleiner Öffnung 200, 309
  - mit Seitenöffnung 198, 311
  - unter Gegendruck 201
- Ausfluss unter Planschütz 201
  - freier Ausfluss 202
  - rückgestauter Ausfluss 204

## B

- Bahnlinie 51, 80
- barometrische Höhenformel 138, 298
- benetzter Umfang 144
- Bernoulligleichung 62, 286
- beschleunigte Strömung 102
- betriebliche Rauheit 117
- bewegte Behälter 41
- Bewuchs eines Gerinneabschnitts 190
- Bezugsdruck 18
- Borda-Carnotscher Stoßverlust 102, 288
- breiter Rechteckquerschnitt 146, 303
- Brunnen 241, 318

## C

- Cross-Verfahren 250

## D

- Dammdurchsickerung 239, 317
- Dampfdruck 10, 19, 116, 138
- Deckwalze 162
- Dichte 5
- Diffusion 12
- diskontinuierliche Strömung 54, 285
- Druck 17
- Druckabfluss 89
- Druckflächenzerlegung 23, 34, 279
- Druckhöhe 17, 62, 286
- Druckkraft 31
  - auf Flächen 23
- Drucklinie 63
- Druckmittelpunkt 25, 31
- Druckstoß 254
  - langsames Schließen 261
  - schnelles Schließen 256
  - weitere Ursachen 261
- durchflossene Fläche 144
- Durchfluss 52
- Durchlässigkeitsbeiwert 232, 233
- Durchströmturbine 111

## E

- Eintauchtiefe 37
- Einzelverlust 99
  - Armatur 106

- Querschnittsänderung 101
- Richtungsänderung 103
- Rohrauslauf 107
- Rohreinlauf 100
- Rohrverzweigung 104
- Einzelverlusthöhe 69
- Elastizitätsmodul 5, 8
- Energiegleichung nach Bernoulli 62
- Energiehöhe 62
- Energielinie 63
  - gefälle 90, 289
- Energieplan 63, 69, 114, 286
- Entwässerungsgraben 245, 318

## F

- Filtergesetz nach Darcy 232
- Fließart 57, 58, 302
- Fließformel
  - nach Darcy-Weisbach 151
  - nach Gauckler-Manning-Strickler 152
- Fließwechsel 160, 302
  - vom Schießen zum Strömen 161
  - vom Strömen zum Schießen 160, 301
  - Wechselsprung 162
- Flüssigkeitsdruck 15
- Formbeiwert 152
- Francisturbine 111
- Freibord 37
- freier Wasserspiegel 89, 143
- Froudezahl 147, 149, 180

## G

- gegliederter Strömungsquerschnitt 188
- Gerinnehydraulik 141
- Geschwindigkeitshöhe 62
- Geschwindigkeitsverteilung 143
- gleichförmige Strömung 54, 150
- Grenzverhältnisse 148, 157, 300
- Grenzzustand 148, 304

## H

- Haltestrukhöhe von Pumpen 128
- hydraulischer Kontrollquerschnitt 181
- hydraulischer Radius 59, 98, 145
- hydraulisch glatt 92
- hydraulisch günstiger Querschnitt 156
- hydraulisch rau 92
- Hydrostatik 15
- hydrostatische Druckverteilung 24, 54, 77, 150
- hydrostatischer Druck 16
- hydrostatisches Paradoxon 31

## I

- ideale Flüssigkeit 56
- Impulskraft 71
- Impulssatz 71
- Impulsstrom 71, 79
- inkompressible Flüssigkeit 5, 88
- instationärer Beckenausfluss 222
  - freier Ausfluss 222
  - unter Gegendruck 226
- instationäre Strömung 53
- integrale Rauheit 117

## J

- Joukowsky-Stoß 256

## K

- kapillare Steighöhe 9, 275
- Kapillarität 9
- Kaplanturbine 111
- Kavitation 116, 135
- kommunizierende Gefäße und Röhren 20
- kompressible Strömungsvorgänge 88
- kontinuierliche Strömung 54
- Kontinuitätsbedingung 60, 288
- Kontrollraum 72, 287
- Konvektion 12
- Kreiselpumpe 125

kritische Reynoldszahl 59, 60  
Kronenformen von Wehren 208

## L

laminar 57  
laminare Strömung 91  
lokaler Verlust 99  
Luftdruck 10, 17, 275

## M

Mechanik 2  
metazentrische Höhe 48, 284  
minimale Energiehöhe 149, 157, 173, 300, 304  
Moody-Diagramm 93, 290

## N

natürliche Fließgewässer 186  
Nettodruckhöhe von Pumpen 128  
nichtkreisförmiger Querschnitt 98  
Normalabfluss 154, 164, 299  
Normalwassertiefe 154, 301  
NPSH-Berechnung 135, 136, 298

## O

Oberflächenspannung 9, 274  
Ortshöhe 62

## P

Parallelbetrieb von Pumpen 132  
Peltonturbine 79, 111  
Piezometerrohr 70  
Pitotrohr 70  
Planschütz 77  
Poleni-Gleichung 210, 311  
Potentiallinien 83  
Potentialliniennetz 83, 235, 236, 316  
Potentialströmung 80  
Potentialwirbel 80, 82  
Prandtlrohr 70

Pumpen 125  
Pumpenbetriebspunkt 129  
Pumpenförderhöhe 127, 293  
Pumpenförderstrom 127  
Pumpenhydraulik 125  
Pumpenkennlinie 127  
Pumpenleistung 110, 293

## Q

Querschnittserweiterung im Gerinne 169  
Querschnittsverringerung im Gerinne 172

## R

reale Flüssigkeit 56  
Rechteckquerschnitt 145  
Reibungsbeiwert 90, 187, 289  
Reibungsverlust 90  
Reibungsverlusthöhe 69, 90, 291  
Reihenbetrieb von Pumpen 132, 297  
relative Rauheit 93, 291  
Reynoldszahl 59, 91, 289  
Ringnetz 249  
Rohrhydraulik 89  
Rohrleitungskennlinie 128  
Rohrnetzarten in der Wasserversorgung 248  
rotierende Behälter 44

## S

Schallgeschwindigkeit 8, 256  
Schießen 147  
schießender Abfluss 148  
Schlauchwaage 20, 21  
Schubspannung 7, 58  
Schütztafel 77  
Schwall und Sunk 262  
Schwimmstabilität 47  
Senkkasten 40  
Sickerströmungen 230  
Speicherberechnung 265  
- Retentionsraum 266  
- Trinkwasser 269

Speicherung 266  
 spezifisches Gewicht 6  
 Standrohr 22, 70, 234, 275  
 stationäre Strömung 53, 285  
 Strahlkontraktion 194  
 Streichwehr 215, 313  
 Strickler-Beiwert 153, 187  
 Strömen 147  
 strömender Abfluss 148  
 Stromfaden 52  
 Stromfadentheorie 52, 57, 62, 143  
 Stromlinien 51, 83  
 Stromröhre 51  
 Strudel 82  
 Stützkraft 73, 77, 79, 310  
 Stützkraftansatz 71, 72  
 Summenlinienverfahren 269

## T

teilgeföllter Kreisquerschnitt 145  
 Tiroler Wehr 219  
 Torricelli-Gleichung 195  
 Tosbecken 163, 164  
 Trapezquerschnitt 145  
 Turbinenleistung 110  
 turbulent 57  
 turbulente Strömung 91, 285

## U

Überdruck 19, 275  
 Überfall 207, 311  
 – unvollkommen 209, 212  
 – vollkommen 209, 210  
 Überfallbeiwert 210, 311  
 Übergangsbereich 92, 290

Überströmung eines Wehrs 193  
 ungleichförmige Strömung 54, 164, 285  
 universelles Fließgesetz 152  
 Unterdruck 19  
 Unterströmung  
 – eines Schützes 193  
 – von Bauwerken 237

## V

Venturikanal 304  
 Venturirohr 66  
 verdrängtes Volumen 37  
 Verdrängungsschwerpunkt 37, 47, 284  
 Verlustarten 69  
 Verlustbeiwert 99, 292  
 Verlusthöhe 68, 288  
 verzögerte Strömung 101  
 viskose Unterschicht 92  
 Viskosität 5, 7, 57  
 – dynamisch 7  
 – kinematisch 7  
 vollgefölltes Rohr 89  
 Volumenstrom 52

## W

Wandschubspannung 57, 58  
 Wasserspiegelbreite 144  
 Wasserspiegellinienberechnung 179  
 Wechselsprung 162  
 Wirbel 82

## Z

Zirkulation 82  
 Zufluss 52