



DIN

— Detlef Aigner | Gerhard Boltrich

Handbuch der Hydraulik

für Wasserbau und Wasserwirtschaft

2., überarbeitete Auflage

Beuth

DIN

Detlef Aigner
Gerhard Bollrich

Handbuch der Hydraulik
für Wasserbau und Wasserwirtschaft

2., überarbeitete Auflage 2021

Herausgeber:
DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

Beuth Verlag GmbH · Berlin · Wien · Zürich

Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

© 2021 Beuth Verlag GmbH

Berlin · Wien · Zürich

Am DIN-Platz

Burggrafenstraße 6

10787 Berlin

Telefon: +49 30 2601-0

Telefax: +49 30 2601-1260

Internet: www.beuth.de

E-Mail: kundenservice@beuth.de

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechts ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in elektronische Systeme.

Die im Werk enthaltenen Inhalte wurden von Verfasser und Verlag sorgfältig erarbeitet und geprüft. Eine Gewährleistung für die Richtigkeit des Inhalts wird gleichwohl nicht übernommen. Der Verlag haftet nur für Schäden, die auf Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit seitens des Verlages zurückzuführen sind. Im Übrigen ist die Haftung ausgeschlossen.

© für DIN-Normen DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin

Titelbild: Panorama der Talsperre Klingenberg,

© Landestalsperrenverwaltung Sachsen / Michael Humbsch

Satz: B & B Fachübersetzerengesellschaft mbH, Berlin

Druck: Drukarnia Skleniarz, Kraków

Gedruckt auf säurefreiem, alterungsbeständigem Papier nach DIN EN ISO 9706

ISBN 978-3-410-30748-8

ISBN (E-Book) 978-3-410-30749-5

Autorenporträts

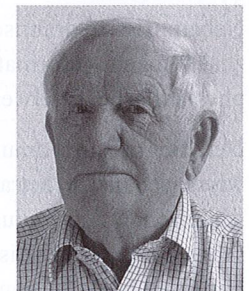
Prof. Dr.-Ing. habil. **Detlef Aigner** war bis 2017 Hochschullehrer an der Technischen Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen. Er studierte Wasserbau und Wasserwirtschaft an der TU Dresden, arbeitete als Planungsingenieur und kehrte 1979 wieder an die Universität zurück, wo er promovierte und habilitierte. Er war bis zu seinem Ruhestand Laborleiter des Hubert-Engels-Labors. In den letzten Jahren standen die physikalische und numerische Modellierung im Wasserbau und in der Wasserwirtschaft im Mittelpunkt seiner fachlichen Arbeit.

Detlef Aigner ist Mitherausgeber und Mitautor des Bandes „Technische Hydromechanik 2“ sowie Autor und Mitautor zahlreicher Fachpublikationen.



Dr.-Ing. habil. **Gerhard Bollrich** vertrat bis 1992 das Lehrgebiet Technische Hydromechanik an der Technischen Universität Dresden. Danach leitete er bedeutende wasserbauliche und wasserwirtschaftliche Projekte im In- und Ausland. Nach 2002 wirkte er an mehreren Hochwasserschutzprojekten mit.

Gerhard Bollrich ist Begründer der Reihe „Technische Hydromechanik“ und Verfasser zahlreicher Fachpublikationen.



Vorwort

Das „Handbuch der Hydraulik“ mit dem Zusatz „für Wasserbau und Wasserwirtschaft“ ist als erweitertes Nachschlagewerk konzipiert und auf die Lösung von praktischen hydromechanischen Aufgabenstellungen des Wasserbaues und der Wasserwirtschaft ausgerichtet. Insbesondere die Hochwasserereignisse der letzten Jahre, aber auch die Wetterextreme wie Trockenheit oder Starkniederschläge als Folge des Klimawandels machen oft eine Neubemessung wasserwirtschaftlicher Anlagen erforderlich. Dieses Buch wird die Ingenieure des Wasserbaus und der Wasserwirtschaft dabei unterstützen.

Im Buch wird auf ausführliche Ableitungen und tiefgreifende Erläuterungen verzichtet. Hier wird auf die Grundlagenbücher und Lehrbücher der Technischen Hydromechanik, der Strömungslehre oder des Wasserbaus verwiesen, die in den letzten Jahren zahlreich auf dem Markt erschienen sind. In diesem Buch wird das Problem benannt, kurz beschrieben und seine Lösung mit dazu erforderlichen Gleichungen und Beiwerten aufgezeigt. Diese sind so aufbereitet, dass sie verständlich und sofort nutzbar sind. Die Lösung eines Problems ist einerseits mit Hilfe von Diagrammen oder Tabellen möglich, kann aber auch andererseits aus Gleichungen und Beiwerten selbst gefunden werden.

Neben den hydraulischen Lösungen enthält das Buch die für ein Handbuch typischen zusätzlichen Informationen wie z. B. mathematische, insbesondere geometrische oder physikalische Tafelwerte und Formeln.

Der Begriff „Hydraulik“, aus dem griechischen Wort „hydro“ (Wasser) abgeleitet, ist wissenschaftlich betrachtet, die Lehre der ruhenden und strömenden Flüssigkeiten. In der technischen Anwendung (technische Hydraulik) wird der Begriff oft nur auf die hydraulischen bzw. pneumatischen Maschinen beschränkt. In diesem Buch wird dieser Begriff als umfassende Definition dieses Fachgebietes verstanden.

Die Hydraulik des Wasserbaues und der Wasserwirtschaft ist als technische Anwendung eher unter dem Begriff „Technische Hydromechanik“ bekannt. Die entsprechende Fachbuchreihe „Technische Hydromechanik“ besteht aus Band 1 als Grundlagenfachbuch für die Ausbildung und das Studium, Band 2 und 4 enthalten spezielle hydraulische Probleme und Band 3, ebenfalls auf die Lehre ausgerichtet, enthält eine Sammlung von Übungsaufgaben und deren Lösungen. Das vorliegende Handbuch der Hydraulik versteht sich als Ergänzung zu diesen Bänden, konzentriert sich dabei auf den Anwender, der die Grundlagen dieses Fachgebietes beherrscht, aber die eine oder andere Formel und den einen oder anderen Beiwert vergessen hat, sucht oder auffrischen möchte. Selbstverständlich sind neuere Untersuchungen, Veröffentlichungen und Erkenntnisse in diesem Buch eingearbeitet, aber man findet auch Vergessenes, schon Bekanntes oder oft Genanntes.

Dresden, Mai 2021

Detlef Aigner
Gerhard Bollrich

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeines	1
1.1	Geschichtliche Entwicklung	1
1.2	Formelzeichen und Einheiten in der Hydraulik	2
1.2.1	Basisgrößen der SI-Einheiten	2
1.2.2	Symbolverzeichnis	3
1.3	Dezimale Vielfache von Einheiten	7
1.4	Griechisches und kyrillisches (russisches) Alphabet, römische Ziffern und Zahlen	7
1.5	Umrechnung von britischen und US-Einheiten in metrische Einheiten	9
1.6	Historische und nicht mehr gebräuchliche Einheiten	12
1.7	Umrechnungen wichtiger Einheiten	12
2	Mathematische Grundlagen in der Hydraulik, wichtige geometrische Werte	15
2.1	Wichtige Zahlenwerte	15
2.2	Trigonometrie	15
2.2.1	Allgemeines Dreieck	15
2.2.2	Rechtwinkliges Dreieck	15
2.2.3	Umrechnungen der Winkelfunktionen	16
2.3	Wichtige Funktionen	16
2.3.1	Quadratische Gleichung	16
2.3.2	Kubische Gleichung	16
2.3.3	Newtonsches Näherungsverfahren	17
2.3.4	Taylor-Reihe	17
2.3.5	Exponentialfunktion	18
2.4	Umrechnung von Gefälle und Böschungsneigung	18
2.5	Flächenberechnung (Auswahl)	19
2.6	Volumenberechnung (Auswahl)	22
2.7	Geometrie von Gerinne-Querschnitten mit offenem Wasserspiegel	23
2.7.1	Offene Gerinne	24
2.7.2	Genormte Kanalquerschnitte bei Vollfüllung nach DIN 4263:2011-06	25
2.8	Schwerpunkt S, Flächenträgheitsmoment und Zentrifugalmoment	27
2.9	Hydraulisch günstige Fließquerschnitte	28
3	Physikalische Größen und Einheiten	33
3.1	Schwerebeschleunigung	33
3.2	Corioliskraft	34
3.3	Gezeiten	35
3.4	Eigenschaften des Wassers	37
3.4.1	Dichte	37
3.4.2	Dichteveränderungen durch Beimengungen	39
3.4.3	Relative Raumänderung des Wassers	41

3.4.4	Dampfdruck des Wassers	41
3.4.5	Viskosität von Wasser	42
3.4.6	Volumenelastizität	43
3.4.7	Druckwellengeschwindigkeit	43
3.4.8	Oberflächenspannung und Kapillarität	46
3.5	Materialwerte weiterer Flüssigkeiten und Gase	48
3.6	Materialwerte von Rohrleitungen und Baustoffen	49
3.7	Sink-, Fall- und Steiggeschwindigkeit	50
3.7.1	Allgemeiner Ansatz	50
3.7.2	Sink- bzw. Absetzgeschwindigkeit von Feststoffen in Wasser	54
3.7.3	Fallgeschwindigkeit von Wassertropfen in Luft	58
3.7.4	Steiggeschwindigkeit von Luftblasen im Wasser	59
3.8	Druck	61
3.8.1	Definition der Druck-Einheiten	61
3.8.2	Atmosphärendruck	62
3.8.3	Absolutdruck und Bezugsdruck	64
3.8.4	Dampfdruck, Haltedruck und Kavitation	65
3.8.5	Druckmessung	67
4	Hydrostatik	69
4.1	Definitionen	69
4.2	Hydrostatische Druckkraft auf ebene Flächen	71
4.2.1	Senkrechte Seitenflächen	71
4.2.2	Konstruktive Lastaufteilung	73
4.2.3	Geneigte Seitenflächen	75
4.2.4	Horizontale Bodenflächen, hydrostatisches Paradoxon	77
4.2.5	Ebene Flächen unterhalb des Wasserspiegels	78
4.3	Zerlegung der Druckkraft in horizontale und vertikale Anteile	81
4.3.1	Geneigte Seitenflächen	82
4.3.2	Polygonartige Stauwand	83
4.3.3	Einfach gekrümmte Stauwand	84
4.3.4	Kreiszyylinderflächen	86
4.4	Innendruck von Behältern, Kesselformel	91
4.5	Flüssigkeitsmanometer	92
4.6	Niveauflächen	94
4.6.1	Kommunizierende Gefäße	95
4.6.2	Niveaufläche in gleichmäßig beschleunigten Gefäßen	95
4.6.3	Niveaufläche in rotierenden Behältern	96
4.6.4	Wasserspiegellage in Gerinnekrümmungen	98
4.7	Auftrieb	99
4.7.1	Im Wasser eingetauchte Körper	99
4.7.2	Hydrostatischer Auftrieb auf Bauwerke	100
4.7.3	Hydrodynamischer Auftrieb auf Bauwerke	101

4.8	Schwimmen und Schwimmstabilität	102
4.8.1	Nachweis der Schwimmfähigkeit	102
4.8.2	Nachweis der Schwimmstabilität	103
4.9	Hydraulische Presse	107
5	Hydrodynamische Grundgleichungen	109
5.1	Einführung	109
5.2	Begriffe und Definitionen	110
5.3	Kontinuität	113
5.4	Allgemeine Strömungsgleichungen	115
5.5	Bernoulli-Gleichung	118
5.6	Fließwechsel	119
5.7	Wellenausbreitung	121
5.8	Flachwassergleichungen	122
5.9	Saint-Venant-Gleichungen	123
5.10	Abflussformeln	124
5.11	Impuls- und Stützkkräfte	125
5.12	Ausgleichsbeiwerte	127
5.13	Filtergesetz von Darcy	128
6	Druckrohrströmung	129
6.1	Einleitung	129
6.2	Energie- und Drucklinie (Durchflussberechnung)	129
6.3	Fließarten, Geschwindigkeitsprofile und Reibungsbeiwert	133
6.3.1	Laminare Rohrströmung	133
6.3.2	Turbulente Rohrströmung	134
6.3.3	Reibungsbeiwert im turbulenten Bereich	137
6.4	Absolute und relative hydraulische Rauheit	142
6.5	Q-d-I-Tafeln zur Durchflussermittlung	143
6.6	Druckrohrsortiment nach DIN (Auswahl)	146
6.7	Nicht kreisförmige Querschnitte	155
6.8	Verkrustung und Alterung von Rohren	158
6.9	Örtliche Verluste in Rohrleitungselementen und Armaturen	160
6.9.1	Verluste durch Querschnittsänderungen	161
6.9.2	Verluste durch Richtungsänderungen	169
6.9.3	Einlaufverluste	171
6.9.4	Auslaufverluste	176
6.9.5	Vereinigungsverluste	177
6.9.6	Verzweigungsverluste	183
6.9.7	Integraler Verlustbeiwert der Rohrverzweigung	185
6.9.8	Verluste an Armaturen	187
6.10	Lufteinschluss und Teilfüllung	198
6.11	Wasserabzug und Wasserverteilung	200
6.11.1	Stromvereinigung	200

6.11.2	Wasserabzug mit gelochten Rohren.....	201
6.11.3	Stromtrennung.....	202
6.11.4	Wasserverteilung.....	202
6.12	Pumpen- und Turbinenleitungen	203
6.12.1	Pumpenleitungen.....	203
6.12.2	Pumpenonderform: Druckluftheber.....	211
6.12.3	Turbinenleitungen.....	215
6.12.4	Hydraulik der Pumpspeicherung.....	218
6.13	Hydraulische Berechnung von Rohrnetzen	221
6.13.1	Wirtschaftliche Fließgeschwindigkeit und wirtschaftlicher Durchmesser.....	222
6.13.2	Netzaufbau.....	225
6.13.3	Hydraulische Kennlinien.....	226
6.13.4	Berechnungsregeln.....	230
6.13.5	Berechnungsverfahren.....	230
6.14	Druckstoß	232
6.14.1	Ursachen und Phänomene.....	232
6.14.2	Berechnungsansätze.....	234
6.14.3	Druckstoßverminderung.....	237
7	Freispiegelströmung	239
7.1	Allgemeines, Begriffe	239
7.2	Fließformeln	242
7.2.1	Fließformel nach Gauckler-Manning-Strickler (GMS-Formel).....	243
7.2.2	Fließformel nach Darcy und Weisbach.....	249
7.2.3	Einfluss der Querschnittsformen auf die Abflussberechnung.....	252
7.2.4	Abflusskurven.....	254
7.3	Abfluss in teilgefüllten, geschlossenen Leitungen	256
7.3.1	Genormte Kanalquerschnitte.....	256
7.3.2	Zuschlagen geschlossener Leitungen bei Teilfüllung.....	262
7.3.3	Abfluss in Durchlässen unter Verkehrswegen.....	262
7.4	Schießen und Strömen	267
7.4.1	Der kritische Fließzustand.....	268
7.4.2	Die Bedeutung der Froude-Zahl.....	274
7.4.3	Hydraulische Effekte beim Fließwechsel Strömen-Schießen.....	275
7.4.4	Der Wechselsprung (Hydraulic Jump).....	276
7.4.5	Ermittlung der Randbedingung v_1 und h_1 am überströmten Wehr.....	277
7.4.6	Fließwechsel durch Verringerung des Fließquerschnittes.....	280
7.4.7	Fließwechsel durch erhöhte Rauheit und Störsteine.....	282
7.4.8	Fließwechsel an unterströmten Verschlüssen.....	283
7.5	Schubspannung und Sohlbewegung	283
7.5.1	Definition der Schubspannung.....	283
7.5.2	Kritische Schubspannung und kritische Geschwindigkeit.....	285
7.5.3	Geschiebetransport.....	288

7.6	Lokale Verluste	290
7.6.1	Einlaufverluste.....	290
7.6.2	Gerinneübergänge.....	291
7.6.3	Krümmungen.....	293
7.6.4	Einbauten (Pfeilerstau).....	295
7.7	Stau- und Senkungslinien	296
7.8	Instationäre Freispiegelströmungen – Schwall- und Sunkwellen	303
7.8.1	Allgemeines.....	303
7.8.2	Berechnungsansatz Schwallwelle.....	305
7.8.3	Sunkwelle, Berechnungsansatz.....	306
7.8.4	Schwall und Sunk im Rechteckquerschnitt.....	306
7.8.5	Näherungsberechnungen.....	307
7.8.6	Schwall in beliebig geformten Gerinnequerschnitten.....	308
7.8.7	Iterative Berechnung der Sunkwellen.....	309
7.8.8	Verformung von Schwallwellen.....	310
7.8.9	Berechnungsbeispiel.....	312
7.8.10	Maßnahmen zum Schwallabschlag.....	316
7.9	Ausfluss aus Öffnungen und unter Schützen	317
7.9.1	Bodenöffnungen.....	318
7.9.2	Seitenöffnung.....	319
7.9.3	Ausfluss unter Schützen.....	321
7.9.4	Rückgestauter Ausfluss.....	325
7.9.5	Rückgestauter Ausfluss aus Seitenöffnungen und Schlitzen.....	328
8	Überfälle und Hochwasserentlastungsanlagen	329
8.1	Einleitung Überfälle	329
8.2	Überfallformel	331
8.3	Überfallbeiwert	332
8.3.1	Basiswert μ_0	332
8.3.2	Beiwert μ_1 der Zulaufgeschwindigkeit.....	335
8.3.3	Beiwert μ_2 der Verluste durch Strahleinschnürung und Ablösung.....	338
8.3.4	Einfluss des Strahldruckes – Beiwert μ_3	339
8.3.5	Der unvollkommene Überfall – Beiwert μ_4	339
8.3.6	Einfluss der schrägen Anströmung – Beiwert μ_5	340
8.3.7	Einfluss von Pfeilern und Seiteneinschnürung – Beiwert μ_6	342
8.4	Rechtecküberfall	344
8.4.1	Breitkroniger Überfall.....	345
8.4.2	Scharfkantiger Überfall.....	347
8.4.3	Beweglicher Überfall.....	349
8.4.4	Zylinderwehr.....	352
8.4.5	Schmalkroniger Überfall.....	354
8.4.6	Standardüberfall.....	356
8.4.7	Dachwehr.....	359

8.4.8	Schlauchwehr	359
8.5	Dreiecküberfall	360
8.6	Parabelüberfall	362
8.7	Kreisüberfall	362
8.8	Proportionalüberfall	364
8.9	Exponentialüberfall	365
8.10	Zusammengesetzte Messwehre	366
8.11	Streichwehr	367
8.12	Piano-Wehr	369
8.13	Tiroler Wehr	370
8.14	Heberüberfall	370
8.14.1	Vergleich Heberüberfall – normaler Überfall	370
8.14.2	Grenzbedingung Unterdruck im Heberscheitel	371
8.14.3	Arbeitszyklus eines und mehrerer Heber	372
8.14.4	Abflusssteuerung durch gestaffelte Heber	373
8.14.5	Abflusssteuerung durch Belüftung des Hebers	374
8.15	Ringförmige Überfälle	377
8.15.1	Schachtüberfall	378
8.15.2	Versturzeleitung	390
8.15.3	Wirbelfallschacht	391
8.16	Sammelrinne	394
8.17	Übergangsrinnen und Schussrinnen	400
8.17.1	Wasserspiegellagenberechnung	400
8.17.2	Luftaufnahme in Schussrinnen	401
8.17.3	Stoßwellen	405
8.17.4	Krümmungseinfluss	408
8.17.5	Kavitation in Schussrinnen	408
8.17.6	Schussrinnenbelüfter	409
8.17.7	Beispiel Schussrinne	410
8.18	Treppen und Kaskaden	412
8.19	Wurfstrahl und Kolkbildung	417
8.20	Tosbecken	421
8.20.1	Formen des Wechselsprunges	421
8.20.2	Die konjugierten Wassertiefen	422
8.20.3	Der Energieverlust des einfachen Wechselsprunges	423
8.20.4	Tosbecken	423
8.20.5	Tosbeckenformen	424
8.20.6	Beispiel Tosbeckenberechnung	427
8.21	Grundablass und Entnahmeeinrichtung	428
9	Wasserstrahlen	435
9.1	Wasserstrahlen in der Luft	435
9.1.1	Senkrechter Wasserstrahl in der Luft	436

9.1.2	Schräger Wasserstrahl in der Luft – Wurfstrahl	441
9.1.3	Wurfstrahl bei Hochwasserentlastungsanlagen	445
9.2	Wasserstrahlen im Wasser	445
9.2.1	Freistrah in unbegrenztem Raum	446
9.2.2	Umgelenkter Freistrah	447
9.2.3	Freistrah in begrenztem Raum mit freiem Wasserspiegel	450
9.3	Strahlausbreitung in einer Querströmung	451
10	Sicker- und Grundwasserströmungen	453
10.1	Begriffe und Definitionen	453
10.1.1	Porosität	453
10.1.2	Suffosion, Erosion und Kolmation	455
10.1.3	Durchlässigkeitsbeiwert	456
10.1.4	Filter und Filteraufbau	461
10.1.5	Kapillare Steighöhe	463
10.2	Grundwasser-Strömungsgleichungen	464
10.3	Brunnenentnahme	466
10.3.1	Ungespanntes Grundwasser	467
10.3.2	Gespanntes Grundwasser	468
10.3.3	Beispiel Brunnen	469
10.4	Strom- und Potentialliniennetz	470
10.5	Sohlwasserdruck	472
10.6	Durchströmung eines Erddammes	477
10.7	Hydraulischer Grundbruch	481
10.8	Geotextile Filter	483
10.9	Stofftransport im Grundwasser	485
Literaturverzeichnis		487
Stichwortverzeichnis		505

1 Allgemeines

1.1 Geschichtliche Entwicklung

Die alten Philosophen zählten das Wasser neben dem Feuer, der Luft und der Erde zu den Urstoffen unseres Lebens. Es verkörperte die Kraft, die Reinheit, den Geist und die Schöpferkraft. Heraklit (etwa 500 v. Chr.) betonte die Dynamik des Wassers durch seine überlieferte Aussage, dass man nicht zweimal in denselben Fluss steigen kann. Als eines der natürlichen Elemente unserer Erde ist das Wasser für Mensch, Tier und Pflanze lebensnotwendig und es bestimmt, angetrieben durch die Sonne, den Lebenszyklus der Erde. Es wird gefördert, gespeichert und transportiert. Die ersten Erkenntnisse des Menschen über das Wasser beruhten auf Beobachtungen und das Sammeln praktischer Erfahrungen. Bauwerke am und im Wasser hielten den Belastungen nicht stand und wurden mit diesen neuen Erkenntnissen wieder aufgebaut. Nachweislich wurden bereits vor über 6.000 Jahren in den alten Kulturzentren Dämme errichtet. Überliefert sind die wissenschaftlichen Erkenntnisse von *Archimedes* (287–212 v. Chr.) z. B. zum Auftrieb. Die archimedische Schraube wird ihm zugeschrieben. Das Phänomen Wasser hielt *Leonardo da Vinci* (1452–1519) in vielen seiner Skizzen und Zeichnungen fest und er beschäftigte sich nicht nur als Maler, sondern auch als Wissenschaftler mit dem Wasser. Seine künstlerischen und zeichnerischen Analysen gingen später in die empirische Phase über, in der durch den Naturversuch Erkenntnisse über das Verhalten des Wassers gesammelt wurden. Im 17. bis 19. Jahrhundert entwickelte sich die Mathematik als Grundlagenwissenschaft und Mathematiker wie *Isaac Newton* (1643–1727), *Daniel Bernoulli* (1700–1782) oder *Louis Navier* (1785–1836) und *George Gabriel Stokes* (1819–1903) entwickelten wichtige Grundlagengleichungen der Hydromechanik, die noch heute ihre Namen tragen. Mit der industriellen Revolution im 19. Jahrhundert und der Entwicklung der Messtechnik entstanden erste empirische Gleichungen zur Bewegung des Wassers. *Henry Darcy* (1803–1858), *Julius Weisbach* (1806–1871), *William Froude* (1810–1879) und *Robert Manning* (1816–1897) waren Vorreiter bei der Aufstellung empirischer Fließformeln für Sickerströmungen und Freispiegelströmungen. *Osborne Reynolds* (1842–1942), *Ludwig Prandtl* (1875–1953) oder *Johann Nikuradse* (1884–1979) lieferten wichtige Erkenntnisse zur Turbulenz, zur Grenzschicht und zur Wandrauheit u. a. als Grundlage zur Berechnung von Druckrohrströmungen. Es entstanden erste Labore zur Analyse von Strömungen. Das erste flussbauliche Laboratorium wurde 1898 von *Hubert Engels* (1854–1945) an der damaligen Königlich Sächsischen Hochschule in Dresden gegründet. Hier wurden erste Untersuchungen zur Auskolkung und Sedimentation in einer Modellrinne durchgeführt. Heute existieren an allen größeren Universitäten Laboreinrichtungen zur Untersuchung von Strömungen. Viele der historischen Erkenntnisse und Gleichungen wurden durch neuere Messverfahren und Auswertetechniken verbessert und weiterentwickelt. Einen umfassenden Überblick über die Geschichte der Hydraulik und ihre herausragenden Persönlichkeiten haben *Hunter Rouse* und *Simon Ince* (1980) sowie *Willi Hager* (2003) gegeben. Die von den Mathematikern aufgestellten Theorien wurden durch den Vergleich mit empirisch gewonnenen Daten verifiziert und anwendbar gestaltet. Dieser Prozess der Verifizierung analytischer Lösungen wurde weiter fortgesetzt und auch von der numerischen Modellierung übernommen.