

# Hydrometrie

Gerd Morgenschweis

# Hydrometrie

Theorie und Praxis der Durchflussmessung in  
offenen Gerinnen



Springer

Prof. Dr. Gerd Morgenschweis  
Bergische Universität Wuppertal  
Institut für Grundbau,  
Abfall- und Wasserwesen  
Lehr- und Forschungsgebiet  
Wasserwirtschaft u. Wasserbau  
Pauluskirchstraße 7  
42285 Wuppertal  
Deutschland  
morgen@uni-wuppertal.de

ISBN 978-3-642-05389-4 e-ISBN 978-3-642-05390-0  
DOI 10.1007/978-3-642-05390-0  
Springer Heidelberg Dordrecht London New York

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Einbandentwurf: WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media ([www.springer.com](http://www.springer.com))

# Vorwort

Die Kenntnis von Wasserstand und Durchfluss der Gewässer ist eine wesentliche Voraussetzung für die Bemessung wasserwirtschaftlicher Anlagen und die rationelle Bewirtschaftung des Wasserdargebots ebenso wie für die Simulation hydrologischer Prozesse mit Hilfe von mathematisch-physikalischen Modellen. Alle ermittelten Bemessungswerte und Bewirtschaftungsregeln können nur so zuverlässig sein, wie es der Informationsgehalt der bereitgestellten Durchflussdaten erlaubt. Daher ist es für eine zukunftsweisende Wasserbewirtschaftung unerlässlich, über möglichst zuverlässige hydrologische Daten zu verfügen.

Die Bereitstellung zuverlässiger hydrologischer Daten ist das Arbeitsgebiet der Hydrometrie, dem Teilgebiet der Hydrologie, das sich mit der Messung hydrologischer Größen befasst. Dies kann ein großes Spektrum an Messgrößen vom Wasserstand und Durchfluss oberirdischer Gewässer über Grundwasser, Bodenfeuchte und Sedimente bis hin zu Güteparametern umfassen. Im Rahmen des beschränkten Umfangs eines Fachbuchs ist es aber nicht möglich, eine umfassende Einführung in die Gesamtheit der Hydrometrie zu geben. Daher wurde sich, in Anlehnung an den englischsprachigen Raum, auf die Wasserstands-, Durchfluss- und Strömungserfassung oberirdischer Gewässer beschränkt; dies soll neben natürlichen Gewässern auch vom Menschen geschaffene oberirdische Gerinne (z. B. offene Abwasserkanäle und Schiffahrtsstraßen) umfassen. Definitionsgemäß ist danach der Durchfluss in geschlossenen Rohrleitungen und unterirdischen Kanälen nicht Thema dieser Publikation. Da die heutige Informations- und Kommunikationstechnik zunehmend die angewandten Messverfahren beeinflusst, ist es aber unabdingbar, digitale Datenspeicherung und -fernübertragung sowie elektronische Datenverarbeitung einzubeziehen.

Die letzte umfassende Darstellung dieses Fachgebiets stammt von Friedrich Schaffernak, einem österreichischen Wasserwirtschaftler. Sein Lehrbuch mit dem Titel „Hydrographie“ wurde 1960 von der Akademischen Druck- und Verlagsanstalt Graz als unveränderter Abdruck der 1935 im Verlag Julius Springer in Wien erschienenen Ausgabe abgedruckt. Danach wurde das Thema lediglich im Rahmen von allgemeinen Lehrbüchern zur Hydrologie und Wasserwirtschaft kurz abgehandelt. Im englischsprachigen Raum sind dagegen in den letzten Jahren einige Fachbücher zur Hydrometrie veröffentlicht worden.

Um diese Lücke zu schließen, wurde ich von Fachkollegen immer wieder angesprochen, mein Wissen aus meiner mehr als 30-jährigen Erfahrung im Bereich der

Durchflussmesstechnik einer breiteren Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen. Persönlich habe ich auf dem Gebiet der hydrologischen Datenerfassung nach 12 Jahren wissenschaftlicher Grundlagenforschung am Institut für Hydrologie der Universität Freiburg i.Br., deren Ergebnisse 1985 in einer Habilitationsschrift mit dem Titel „Aspekte der hydrologischen Datenerfassung, -analyse und -anwendung in den Teilgebieten Abfluss, Seeverdunstung und Bodenwasser“ umfassend dargestellt wurden, in den letzten 28 Jahren praktische Erfahrungen als Hydrologe beim Ruhrverband, bei dem ich für die Steuerung des größten deutschen Talsperrensystems verantwortlich war, sammeln können. Der Kontakt zur Wissenschaft blieb in diesem Zeitraum durch Lehrtätigkeiten an verschiedenen Universitäten im In- und Ausland erhalten; Schwerpunkt der Lehrtätigkeit ist heute die Bergische Universität Wuppertal, an der ich seit 1992 als apl. Prof. am Lehr- und Forschungsgebiet Wasserwirtschaft und Wasserbau im Fachbereich Bauingenieurwesen tätig bin. Darüber hinaus bin ich Mitglied im DWA-Ausschuss „Hydrometrie“ und im entsprechenden DIN-Ausschuss.

Das Buch möchte einen breiten Leserkreis aus vielen Fachbereichen mit den Grundlagen der Hydrometrie oberirdischer Gewässer vertraut machen und sich nicht nur an Spezialisten wenden, sondern auch Informationen an Praktiker weitergeben. Zum besseren Verständnis sind daher eine Reihe von Berechnungsbeispielen eingearbeitet und Informationen über nationale wie auch internationale Herstellerfirmen angefügt. Für Studierende werden umfangreiche weitergehende Literaturhinweise am Ende jedes Hauptkapitels gegeben, die zum vertiefenden Studium anregen sollen. Die Gliederung des Buchs orientiert sich am natürlichen Wasserkreislauf, beginnt mit der Erfassung des Wasserstands, gefolgt von den verschiedenen Möglichkeiten der mobilen und stationären kontinuierlichen Durchflusserfassung, und endet mit der Erfassung, Speicherung, Fernübertragung und Weiterverarbeitung der Messdaten sowie den zugrundeliegenden Messnetzen und dazu notwendigen Organisationsformen.

Ich danke allen Fachkollegen, die mich beharrlich zu dieser Arbeit angeregt und im Laufe der letzten Jahre immer wieder unterstützt haben; hier möchte ich insbesondere meinen langjährigen Freund und Kollegen Dr. G. Luft, die Kolleginnen und Kollegen des Lehr- und Forschungsgebietes Wasserwirtschaft und Wasserbau der Bergischen Universität Wuppertal sowie die Mitglieder der DWA-Arbeitsgruppe „Hydrometrie“, insbesondere die Kollegen M. Adler und S. Siedschlag, nennen. Dank auch an die Herstellerfirmen hydrometrischer Messsysteme, die mich reichlich mit Bildmaterial und technischen Informationen bedacht haben. Mein besonderer Dank gilt meiner langjährigen Sekretärin Frau A. Fricke, die mit Ausdauer und Geduld für die Reinschrift des Manuskripts sorgte. Sie wurde unterstützt von Frau A. Ochs und Frau U. Haak, die die Druckvorlagen der Graphiken und Tabellen anfertigten. Last, but not least möchte ich Frau Dipl.-Hydr. I. Budach danken, die als immer kritische Lektorin viel zur fachlichen und sprachlichen Verbesserung des Textes beigetragen hat. Dem Ruhrverband, und hier insbesondere der Hauptabteilung Talsperrenwesen, möchte ich für die vielfältige Unterstüzung dieser Arbeit meinen Dank aussprechen. Dem Springer-Verlag bin ich für die geduldige und vertrauensvolle Zusammenarbeit dankbar. Zum guten Schluss gilt mein besonderer Dank meiner Frau, ohne deren tatkräftige Unterstüzung diese Veröffentlichung nicht zustandegekommen wäre.

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Aufgaben und Bedeutung der Hydrometrie</b>	1
1.1	Definition	1
1.2	Aufgaben und Inhalte	1
1.3	Kurzer geschichtlicher Abriss der Hydrometrie	2
	Literatur	6
<b>2</b>	<b>Grundbegriffe</b>	9
2.1	Abflussbildung und Wasserkreislauf	9
2.2	Wasserstand, Abfluss und Durchfluss	9
2.3	Hydraulische Grundlagen des Durchflusses in offenen Gerinnen	10
2.3.1	Physikalische Eigenschaften des Wassers	11
2.3.2	Der Durchfluss in offenen Gerinnen	13
2.3.3	Empirische Fließformeln	19
	Literatur	22
<b>3</b>	<b>Messung des Wasserstands</b>	25
3.1	Definition und Zweck von Wasserstandsmessungen	25
3.2	Kriterien für die Standortwahl einer Pegelstelle	26
3.3	Überblick über Messeinrichtungen zur Wasserstandserfassung	27
3.4	Nichtregistrierende Pegel	28
3.4.1	Lattenpegel	28
3.4.2	Stauhöhenpegel	32
3.4.3	Stech- oder Abstichpegel	34
3.5	Selbstregistrierende Pegel	36
3.5.1	Scheitelwert- oder Grenzwertmarkierpegel	37
3.5.2	Mechanischer Schwimmerpegel	41
3.5.3	Einperl- oder Druckluftpegel	52
3.5.4	Drucksondenpegel	59
3.5.5	Ultraschall-Echolotpegel	65
3.5.6	Wasserstandsmessung mit Radar und „geführten“ Mikrowellen	72
3.5.7	Weitere Verfahren zur Wasserstandserfassung	83

3.5.8	Aufzeichnung und Speicherung von Wasserstandsdaten .....	86
3.5.9	Vergleichende Betrachtung der Messunsicherheit verschiedener Verfahren der Wasserstandsmessung .....	95
3.5.10	Zusammenfassende Wertung und Kriterien zur Wahl von Wasserstandsmessverfahren .....	102
	Literatur .....	103
	Firmeninformationen und -produkte .....	105
<b>4</b>	<b>Messung des Durchflusses</b> .....	<b>107</b>
4.1	Einführung .....	107
4.2	Grundgleichungen .....	107
4.3	Überblick über Methoden der Durchflussmessung .....	109
4.4	Volumetrische Durchflussmessung .....	111
4.4.1	Messgefäße .....	112
4.4.2	Messbecken .....	113
4.4.3	Kippgefäße .....	114
4.4.4	Danaide .....	115
4.5	Durchflussbestimmung über die Messung des Durchfluss- querschnitts und der Fließgeschwindigkeit einzelner Lot- rechten (Stromfäden) .....	118
4.5.1	Geschwindigkeitsverteilung in einem Gewässer .....	118
4.5.2	Festlegung der Lage und Anzahl von Messpunkten .....	122
4.5.3	Überblick über Messgeräte zur punkthaften Fließ- geschwindigkeitsmessung .....	124
4.5.4	Hydrometrische Flügel .....	127
4.5.5	Magnetisch-induktive Strömungssonden (MID) .....	137
4.5.6	Ultraschall-Doppler-Strömungssonden .....	143
4.5.7	Schwimmer zur Fließgeschwindigkeitsmessung .....	158
4.5.8	Pendeldurchflussmesser .....	164
4.5.9	Pitot- und Prandtl-Staurohre .....	168
4.5.10	Thermische Strömungssonden .....	174
4.5.11	Laser-Doppler-Strömungsmesser .....	177
4.5.12	Durchführung von Punktmessungen der Fließgeschwindigkeit .....	183
4.5.13	Berechnung der mittleren Fließgeschwindigkeit und des Gesamtdurchflusses nach der Geschwindigkeitsflächenmethode .....	197
4.5.14	Unsicherheiten der punkthaften Geschwindigkeits- messung und der Geschwindigkeitsflächenmethode .....	208
4.5.15	Zusammenfassende Wertung und Kriterien zur Aus- wahl von Geräten zur punkthaften Geschwindig- keitsmessung .....	214
4.6	Bestimmung des Durchflusses über die Messung des Durch- flussquerschnitts und der mittleren Querschnittsgeschwindigkeit .....	217
4.6.1	Messschirme .....	218

- 4.6.2 Mobile Ultraschall-Doppler-Geräte (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP) ..... 219
- 4.6.3 Tracerverfahren ..... 253
- 4.6.4 Durchführung von Integrationsmessungen zur Bestimmung der mittleren Querschnittsgeschwindigkeit ..... 273
- 4.6.5 Berechnung des Durchflusses über die mittlere Querschnittsgeschwindigkeit ..... 279
- 4.6.6 Kriterien zur Auswahl von Verfahren zur integrierten Messung von Querschnittsgeschwindigkeiten ..... 280
- 4.7 Weitere Verfahren der mobilen Durchflussmessung ..... 282
  - 4.7.1 Mobile Venturikanäle ..... 282
  - 4.7.2 Mobile Überfallwehre ..... 285
  - 4.7.3 Durchflussmessung mit aufsteigenden Luftblasen ..... 286
- Literatur ..... 294
- Firmeninformationen und -produkte ..... 300
  
- 5 Kontinuierliche Erfassung des Durchflusses ..... 303**
  - 5.1 Standortwahl und Ausstattung einer Durchflussmessstelle ..... 304
    - 5.1.1 Wahl des Messquerschnitts ..... 304
    - 5.1.2 Ausstattung einer Durchflussmessstelle ..... 305
  - 5.2 Überblick über Methoden der kontinuierlichen Durchflussmessung ... 310
  - 5.3 Durchflussmessung mit Hilfe von Durchflussmessbauwerken und hydraulischen Bestimmungsgrößen ..... 311
    - 5.3.1 Einführung ..... 311
    - 5.3.2 Hydraulische Funktion von Messbauwerken ..... 312
    - 5.3.3 Typisierung von Durchflussmessbauwerken ..... 317
    - 5.3.4 Scharfkantige Wehre ..... 318
    - 5.3.5 Breitkronige Wehre ..... 331
    - 5.3.6 Schmalkronige Wehre (Wehrschwellen) ..... 337
    - 5.3.7 Venturi-Gerinne ..... 344
    - 5.3.8 H-Flumes ..... 357
    - 5.3.9 Ausflussöffnungen (Orifices) ..... 365
    - 5.3.10 Kalibrierung von Durchflussmessbauwerken ..... 368
    - 5.3.11 Unsicherheiten bei der Durchflussermittlung mit Messbauwerken ..... 370
    - 5.3.12 Auswahl eines geeigneten Durchflussmessbauwerks..... 374
    - 5.3.13 Nationale und internationale Normen zu Durchflussmessbauwerken ..... 376
  - 5.4 Durchflussermittlung über Wasserstand-Durchfluss-Beziehungen (Durchfluss- oder Abflusskurven) ..... 377
    - 5.4.1 Prinzip ..... 377
    - 5.4.2 Aufstellen von Wasserstand-Durchfluss-Beziehungen ..... 378
    - 5.4.3 Extrapolation im Hoch- und Niedrigwasserbereich ..... 389
    - 5.4.4 Festlegen des zeitlichen Gültigkeitsbereichs ..... 394
    - 5.4.5 Durchflusstabelle (Abflusstafel) ..... 396



5.4.6	Sensitivität und Unsicherheit von Durchflusskurven .....	397
5.4.7	Korrektur der Durchflussermittlung bei zeitlich begrenzten Veränderungen der Durchflusskurve .....	404
5.4.8	Zusammenfassung .....	409
5.5	Durchflusserfassung mit Ultraschall .....	410
5.5.1	Einführung .....	410
5.5.2	Messverfahren .....	410
5.5.3	Ultraschall-Laufzeit-Verfahren .....	411
5.5.4	Ultraschall-Doppler-Verfahren .....	431
5.5.5	Zusammenfassung .....	438
5.6	Durchflusserfassung nach dem magnetisch-induktiven Prinzip (MID) .....	439
5.6.1	Einführung .....	439
5.6.2	Magnetisch-induktives Messprinzip .....	440
5.6.3	Anforderungen an eine MID-Messstelle .....	441
5.6.4	Anwendung des magnetisch-induktiven Messprin- zips zur kontinuierlichen Durchflussermittlung in offenen Gerinnen .....	442
5.6.5	Vor- und Nachteile .....	450
5.7	Durchflusserfassung durch kontinuierliche Messung des Wasserspiegelgefälles ( $\Delta W$ -Verfahren) .....	451
5.7.1	Einführung .....	451
5.7.2	Messprinzip der $\Delta W$ -Durchflussmessung .....	453
5.7.3	$\Delta W$ -Anlage zur Messung instationärer Durchflüsse .....	455
5.8	Visuelle Durchflussmessung .....	466
5.8.1	Einführung .....	466
5.8.2	Messprinzip .....	467
5.8.3	Messtechnische Umsetzung .....	468
5.8.4	Durchführung von kontinuierlichen visuellen Durchflussmessungen .....	471
5.8.5	Ergebnisse visueller Durchflussmessungen.....	472
5.8.6	Zusammenfassung .....	473
5.9	Durchflusserfassung durch Messung der Oberflächengeschwindigkeit .....	473
5.9.1	Einführung .....	473
5.9.2	Messung der Oberflächengeschwindigkeit mit Radar.....	474
5.9.3	Weitere Verfahren zur Durchflussbestimmung über Oberflächengeschwindigkeitsmessungen .....	484
5.10	Durchflussermittlung an Staustufen, Schleusen, Pumpstationen sowie Fischauf- und -abstiegshilfen .....	487
5.10.1	Einführung.....	487
5.10.2	Prinzip der Durchflussermittlung an Staustufen und Schleusen .....	488
5.10.3	Messtechnische Erfassung des Durchflusses .....	489
5.10.4	Kalibrierung .....	497

5.10.5	Unsicherheit .....	498
5.10.6	Zusammenfassung .....	498
5.11	Zusammenfassende Wertung und Kriterien zur Auswahl von Methoden zur kontinuierlichen Durchflusserfassung .....	499
	Literatur .....	502
	Firmeninformationen und -produkte .....	510
<b>6</b>	<b>Datenerfassung und -fernübertragung .....</b>	<b>513</b>
6.1	Datenerfassung vor Ort .....	513
6.1.1	Analog-mechanische Registrierung .....	513
6.1.2	Elektronische Datenerfassung .....	513
6.2	Datenfernübertragung (DFÜ) .....	516
6.2.1	Datenfernübertragung über Kabelwege .....	516
6.2.2	Datenfernübertragung über das öffentliche Telefonnetz .....	518
6.2.3	Datenfernübertragung über Funk .....	526
6.2.4	Datenfernübertragung über Satelliten .....	527
6.2.5	Datenmanagementsysteme .....	529
6.3	Zusammenfassende Wertung .....	532
	Literatur .....	533
	Firmeninformationen und -produkte .....	534
<b>7</b>	<b>Primärstatistische Auswertung von Wasserstands- und Durchflussdaten .....</b>	<b>537</b>
7.1	Einführung .....	537
7.2	Erste Qualitätsüberprüfung von Messdaten .....	537
7.3	Umsetzung von Wasserstandsdaten in Durchflusswerte .....	539
7.4	Primärstatistische Auswertung von Wasserstands- und Durchflussdaten .....	541
7.4.1	Gang- und Summenlinien .....	541
7.4.2	Dauerlinien .....	544
7.4.3	Gewässerkundliche Hauptzahlen .....	546
7.4.4	Hydrologische Längsschnitte .....	548
7.5	Zusammenfassende Wertung und Ausblick .....	548
	Literatur .....	550
	Firmeninformationen und -produkte .....	551
<b>8</b>	<b>Messnetze zur Durchflusserfassung .....</b>	<b>553</b>
8.1	Aufgabe und historische Entwicklung .....	553
8.2	Erforderliche Messnetzdichte .....	555
8.3	Erforderliche Beobachtungslänge .....	556
8.4	Kategorien von Beobachtungsnetzen .....	557
8.5	Optimierung von Messnetzen .....	558
8.6	Redundanz von Wasserstands- und Durchflussmessnetzen .....	560
8.6.1	Datenverfügbarkeit .....	560
8.6.2	Messunsicherheit .....	562

- 8.6.3 Redundanz-Kategorien für Pegelmessnetze ..... 563
- 8.7 Zusammenfassende Wertung ..... 566
- Literatur ..... 566
  
- 9 Organisation von hydrologischen Messdiensten ..... 569**
  - 9.1 Aufgaben und Organisationsformen ..... 569
  - 9.2 Personelle Anforderungen ..... 570
  - 9.3 Messgeräteausrüstung ..... 571
  - 9.4 Messwertprotokolle ..... 572
  - 9.5 Sicherheitsaspekte ..... 573
  - 9.6 Zusammenfassende Wertung ..... 573
  - Literatur ..... 575
  
- Sachverzeichnis ..... 577**