

Stefan Siedschlag

Praxisbuch für die Hydrometrie

Anleitung zur Abflussmessung in
Fließgewässern

 Springer Vieweg

Praxisbuch für die Hydrometrie

Stefan Siedschlag

Praxisbuch für die Hydrometrie

Anleitung zur Abflussmessung in
Fließgewässern

 Springer Vieweg

Stefan Siedschlag
Berlin, Deutschland

ISBN 978-3-658-45469-2 ISBN 978-3-658-45470-8 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-45470-8>

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

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2025

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jede Person benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des/der jeweiligen Zeicheninhaber*in sind zu beachten.

Der Verlag, die Autor*innen und die Herausgeber*innen gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autor*innen oder die Herausgeber*innen übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Daniel Fröhlich

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Wenn Sie dieses Produkt entsorgen, geben Sie das Papier bitte zum Recycling.

Vorwort

Abfluss messen in Fließgewässern ist nicht nur eine der Kernaufgaben bei der Lösung wasserwirtschaftlicher und wasserbaulicher Fragestellungen. Es ist eine Tätigkeit, die spannend sein kann und eine willkommene Abwechslung in den mit Bildschirmarbeit überfrachteten Arbeitsalltag bringt. Raus an die frische Luft, Messgeräte auspacken, messen und schauen, wie sich die Gewässer unter den verschiedenen Abflussbedingungen verhalten. Das kann Spaß machen und es ist sinnstiftend, sieht man doch am Ende der Messung ein nützliches Ergebnis, welches für die Lösung vielfältigster Aufgaben benötigt wird. Abflussmessungen in Extremsituationen wie Niedrig- oder Hochwasser sind essentiell für operative Entscheidungsprozesse. Eine Hochwasserwelle mit Messungen zu begleiten, Scheitelwerte messtechnisch zu erfassen, das ist eine echte Herausforderung für Hydrologinnen und Hydrologen. Je öfter man misst, umso mehr bekommt man ein Gefühl für ‚sein‘ Gewässer, kann Messsituationen besser einschätzen und Messergebnisse sachkundiger überprüfen.

Während meiner über 30-jährigen Tätigkeit als Trainer für die Abflussmessung in offenen Gerinnen habe ich immer wieder in viele interessierte Gesichter geschaut. Darunter waren erfahrene Fachkräfte genauso vertreten wie Quereinsteiger aus fachfremden Bereichen wie z. B. der Landwirtschaft, der Verwaltung, dem Forst. Nicht selten kam am Schluss eines Kurses die Frage auf, wo man den Stoff nochmal nachlesen könne, ohne sämtliche Regelwerke und Normen studieren zu müssen.

Selbstverständlich gibt es eine Unmenge an Literatur zu diesem Thema, darunter hervorragende, sehr ausführliche und detaillierte Nachschlagewerke wie das 2010 von Morgenschweis veröffentlichte und 2018 in zweiter Auflage erschienene Kompendium „Hydrometrie – Theorie und Praxis der Durchflussmessung in offenen Gerinnen“ oder der von der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) 2018 herausgegebene „Leitfaden zur Hydrometrie des Bundes und der Länder – Pegelhandbuch“. Es gibt das Internet mit seinen unendlichen Weiten an Informationsquellen und neuerdings auch KI-gestützte Suchassistenten. Wozu also noch ein Buch schreiben? Ganz einfach, um all denen, die in

die Thematik mal ‚reinschnuppern‘ wollen, die diesbezüglich Neuland betreten, eine kurzweilige Einführung zu geben und auch jenen, die ihre Kenntnisse auffrischen möchten, mit praktischen Hinweisen zur Seite zu stehen.

Dieses Buch ersetzt nicht das Lesen der jeweiligen Handbücher der verschiedenen Messgeräte. Es ist kein Ersatz für die Lektüre der einschlägigen Normen und Regelwerke. Es ist eine Einführung in die Abflussmessung in Fließgewässern mit den derzeit gängigen Verfahren und Geräten.

Ich danke allen, die mich zum Schreiben dieses Buches ermutigt und mit fachlichem Rat, Text- und Bildmaterial unterstützt haben. Stellvertretend genannt seien an dieser Stelle Herr Uwe Köhler und Herr Thomas Otto von der Staatlichen Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft, Messnetzbetrieb Wasser und Meteorologie in Chemnitz, Frau Anne Oelschner und ihr Team vom Dezernat Gewässerkunde beim Staatlichen Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg, Frau Claudia Beyer und Herr Reinhard Beetz von der Thüringer Landesgesellschaft, Herr Hanspeter Hodel von der Landeshydrologie Bern in der Schweiz.

Ein großes Dankeschön gilt auch den Herstellerfirmen, die mich wohlwollend mit Text- und Bildmaterial unterstützt haben. Herrn Dr. Issa Hansen von der Firma SEBA Hydrometrie danke ich für seinen fachlichen Rat bei der Beschreibung der kamerabasierten Durchflussmessung. Herr Christoph Sommer von der Sommer Messtechnik GmbH verdanke ich den neuesten Stand in Sachen Tracermessung. Herr Dr. Anton Felder von der Kisters AG ließ mich an der Genese eines neuen Radarsensors zur Messung von Oberflächengeschwindigkeiten teilhaben. Auch ihm herzlichen Dank.

Zu guter Letzt danke ich meiner Frau für ihre aktive Unterstützung beim Redigieren des Manuskriptes. Als fachfremde Leserin könne sie nun auch Abfluss messen, war ihr Statement am Schluss. Das stimmt mich optimistisch und ich hoffe, Ihnen geht es genauso.

Berlin
im Juni 2024

Stefan Siedschlag

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
1.1 Warum wird der Abfluss gemessen?	1
1.2 Wie oft wird der Abfluss gemessen?	3
1.3 Was versteht man unter einem Fließgewässer?	3
1.4 Welche Messgeräte und -verfahren kommen für die Abflussmessung zum Einsatz?	4
1.5 Wie groß ist die Messunsicherheit bei Abflussmessungen?	4
1.6 Typische Abflussbedingungen in Fließgewässern	7
1.6.1 Langsam fließende Gewässer	7
1.6.2 Schnell fließende Gewässer	8
1.6.3 Schiffbare Gewässer	8
1.6.4 Staugeregelte Gewässer	10
1.6.5 Gewässer mit Rückströmung	11
1.6.6 Gewässer mit Vegetation im Fließquerschnitt	12
1.6.7 Gewässer mit hohem Schwebstoffanteil	13
1.6.8 Gewässer mit stehenden Wellen	13
1.6.9 Hochwasserführende Gewässer	14
1.6.10 Niedrigwasserführende Gewässer	15
Literatur	16
2 Hydraulische Grundlagen für den Abfluss in offenen Gerinnen	17
2.1 Begriffsbestimmung und Definitionen	17
2.1.1 Einführende Bemerkungen	17
2.1.2 Abfluss und Durchfluss	18
2.1.3 Die Abflusskurve	20
2.2 Physikalische Eigenschaften von Wasser	24
2.2.1 Einführende Bemerkungen	24
2.2.2 Dichte	24
2.2.3 Volumenelastizität und Kompressibilität	25

2.2.4	Viskosität	25
2.2.5	Oberflächenspannung	26
2.2.6	Kapillarität	27
2.2.7	Bildung von Wasserdampf	29
2.3	Arten der Fließbewegung	30
2.3.1	Vorbemerkungen	30
2.3.2	Laminares und turbulentes Fließen	31
2.3.3	Strömen und Schießen	33
2.3.4	Stationäres und instationäres Fließen	37
2.3.5	Gleichförmige und ungleichförmige Bewegung	37
2.4	Die Geschwindigkeitsverteilung	39
2.5	Strömungs- und Rauigkeitsverhältnisse	42
2.6	Fließformeln	44
2.7	Durchflussberechnung	48
2.8	Die Geschwindigkeits-Index-Methode	51
	Literatur	58
3	Anwendung von Ultraschall in der Hydrometrie	61
3.1	Vorbemerkung	61
3.2	Begriffsbestimmungen	61
3.3	Ultraschall im Wasser	63
3.4	Der Doppler-Effekt	66
3.5	Doppler – Signalverarbeitungstechniken	68
3.6	Die akustische Echokreuzkorrelationsmethode	70
	Literatur	71
4	Mobile Abflussmessung nach dem Lotrechtenverfahren	73
4.1	Vorbemerkungen	73
4.2	Auswahl und Beschaffenheit der Messstelle	73
4.2.1	Lage der Messstelle am Fließgewässer	73
4.2.2	Die Lage zum Bezugspegel	75
4.2.3	Kennzeichnung des Messquerschnittes	75
4.2.4	Besonderheiten bei der Messung von Brücken und Messstegen	77
4.2.5	Wartung und Erhaltung des Messquerschnittes	78
4.3	Die Messausrüstung	79
4.3.1	Vorbemerkungen	79
4.3.2	Ausrüstung zur Messung des Lotrechtenabstandes vom Querschnittsnulppunkt	79
4.3.3	Ausrüstung zur Messung der Wassertiefe	80
4.3.4	Transportable und ortsfeste Messeinrichtungen	80
4.3.5	Geräte zur Messung der Fließgeschwindigkeit	81

4.3.6	Zusatzmessgeräte	82
4.3.7	Hilfsgeräte	82
4.3.8	Arbeitsschutzmittel	82
4.4	Vorbereitung der Messung	83
4.4.1	Vorbemerkungen	83
4.4.2	Querprofilaufnahme des Messquerschnittes	84
4.4.3	Festlegung von Anzahl und Lage der Messlotrechten	84
4.4.4	Festlegung von Anzahl und Lage der Messpunkte	85
4.5	Durchführung einer Punktmessung	87
4.5.1	Die Vorbereitung des Messquerschnittes	87
4.5.2	Das Messprotokoll	87
4.5.3	Die Beobachtung und Registrierung des Wasserstandes	88
4.5.4	Der Messablauf	89
4.5.5	Auswertung und Plausibilitätsprüfung der Messergebnisse	90
4.6	Durchführung einer Abflussmessung unter Eisbedingungen	91
	Literatur	93
5	Messgeräte und -methoden zur mobilen Abflussmessung	95
5.1	Die Schwimmermessung	95
5.1.1	Vorbemerkungen	95
5.1.2	Messprinzip	96
5.1.3	Auswählen und Einrichten der Messtelle	97
5.1.4	Messausrüstung	97
5.1.5	Durchführung der Messung	97
5.1.6	Auswertung der Messung für Oberflächenschwimmer	98
5.2	Die Messung mit hydrometrischen Messflügeln	99
5.2.1	Einführende Bemerkungen	99
5.2.2	Das Messprinzip	100
5.2.3	Der Stangenflügel	101
5.2.4	Das Messgestänge	103
5.2.5	Die Flügschaufeln	106
5.2.6	Schwimmflügel	108
5.2.7	Das Zählgerät	110
5.2.8	Seilkrananlagen	111
5.2.9	Kalibrierung der Messflügel	115
5.2.10	Anforderungen an die Messtelle	118
5.2.11	Durchführung einer Stangenflügelmessung	118
5.2.12	Durchführung einer Schwimmflügelmessung	122
5.2.13	Auswertung der Messung und Prüfung der Ergebnisse	125
5.2.14	Pflege und Wartung der Messausrüstung	129

5.3	Die Messung mit magnetisch-induktiven Strömungs sonden	132
5.3.1	Einführende Bemerkungen	132
5.3.2	Das Messprinzip	133
5.3.3	Anforderungen an die Messtelle	135
5.3.4	Messausrüstung	135
5.3.5	Durchführung der Messung	136
5.3.6	Auswertung der Messung und Prüfung des Ergebnisses	139
5.3.7	Pflege und Wartung der Messausrüstung	140
5.4	Die Messung mit Markierungsstoffen	141
5.4.1	Einführende Bemerkungen	141
5.4.2	Das Messprinzip	141
5.4.3	Methode mit konstanter Eingabe	142
5.4.4	Integrationsmethode	143
5.4.5	Anforderungen an die Messtelle	144
5.4.6	Messausrüstung	145
5.4.7	Durchführung einer Integrationsmessung mit Kochsalz	147
5.4.8	Auswertung der Messung und Prüfung des Ergebnisses	149
5.5	Die Messung mit akustischem Doppler-Strömungsmessgerät (ADCP)	149
5.5.1	Einführende Bemerkungen	149
5.5.2	Das Messprinzip	150
5.5.3	Anforderungen an die Messtelle	153
5.5.4	Messausrüstung	154
5.5.5	Vorbereitung und Durchführung der Messung	155
5.5.6	Auswertung der Messung und Prüfung des Ergebnisses	161
5.5.7	Korrektur der Ergebnisse bei bewegter Sohle	162
5.5.8	Qualitätssicherung von ADCP-Messdaten	163
5.6	Sonstige mobile Messgeräte und Verfahren (eine Auswahl)	166
5.6.1	NivuFlow Stick	166
5.6.2	Sontek FlowTracker 2	167
5.6.3	Tauchstab nach Jens	169
5.6.4	Mobile Radarmessung	171
5.6.5	Gefäßmessung	172
	Literatur	175
6	Die stationäre Abflussmessung	177
6.1	Vorbemerkung	177
6.2	Hinweise zu Planung und Bau kontinuierlicher Messstellen	177
6.2.1	Voruntersuchung/Messtellenerkundung	177
6.2.2	Bauplanung	179

6.3	Ultraschall-Laufzeitanlagen	180
6.3.1	Aufbau und Funktionsweise	180
6.3.2	Anlagenkonfigurationen	183
6.3.3	Messstellenevaluierung	186
6.3.4	Wandlerfrequenzen und Installation	187
6.3.5	Inbetriebnahme und Kalibrierung	188
6.4	Horizontale Ultraschall-Doppler-Anlagen (Side-Looker)	189
6.4.1	Aufbau und Funktionsweise	189
6.4.2	Physikalische Randbedingungen für den Einsatz von H-ADCP-Geräten	192
6.4.3	Hydraulische Randbedingungen und Messstellenevaluierung	193
6.4.4	Hinweise zur Installation und Betrieb	195
6.4.5	Inbetriebnahme und Kalibrierung	198
6.5	Vertikale Ultraschall-Doppleranlagen (Up-Looker)	199
6.5.1	Aufbau und Funktionsweise	199
6.5.2	Messstellenevaluierung	200
6.5.3	Hinweise zur Installation	201
6.5.4	Inbetriebnahme und Kalibrierung	202
6.6	Radar – Doppler-Anlagen	202
6.6.1	Aufbau und Funktionsweise	202
6.6.2	Messstellenevaluierung	207
6.6.3	Installation	213
6.6.4	Inbetriebnahme und Kalibrierung	214
6.6.5	Datenprüfung	215
6.7	Kamerabasierte Durchflussmessung	216
6.7.1	Einleitende Bemerkungen	216
6.7.2	Messprinzip und Systemaufbau	217
6.7.3	Installation und Inbetriebnahme	219
6.7.4	Kalibrierung und Validierung des Messsystems	219
6.7.5	Einsatzgrenzen sowie Vor- und Nachteile	220
	Literatur	222
7	Ausblick	225
	Literatur	226
	Stichwortverzeichnis	227



1.1 Warum wird der Abfluss gemessen?

Die Abflussmessung gehört neben der Beobachtung und Messung von Wasserständen zu den Kernaufgaben der Hydrometrie und liefert wichtige Kenntnisse für die Lösung vielfältiger wasserwirtschaftlicher und wasserbaulicher Fragestellungen. Sie dient unter anderem

- der qualifizierten Untersuchung des Wasserhaushaltes und der Ermittlung des verfügbaren, nutzbaren Wasserdargebotes für verschiedene Nutzungsansprüche (z. B. Schifffahrt, Trinkwasserentnahme, Landwirtschaft, Fischerei, Hochwasserschutz, Freizeit und Erholung, Natur- und Artenschutz)
- als Grundlage für die Planung und Unterhaltung wasserwirtschaftlicher Anlagen wie bspw. Hochwasserschutzdeiche, Fischaufstiegsanlagen, wasserbauliche Anlagen (Wehre, Schleusen und Schöpfwerke), Talsperren, Wasserkraftanlagen, Bauwerke für die Trinkwasserentnahme, Bewässerungssysteme etc.
- als Basis für die Planung und den Unterhalt schiffbarer Wasserstraßen
- als Grundlage für den operativen Vorhersagebetrieb von Hochwasser- und Niedrigwasserereignissen
- der Steuerung komplexer wasserwirtschaftlicher Systeme (z. B. Einhaltung landschaftlich notwendiger Mindestabflüsse bei Stauhaltungen und Wasserkraftanlagen)
- der Untersuchung und Beurteilung anthropogener Einflüsse
- als Grundlage für die Untersuchung der Wassergüte bzw. die Ermittlung und Bilanzierung von Wasserinhaltsstoffen (z. B. Berechnung der Stofffrachten im Falle einer Havarie mit Einleitung von Wasserschadstoffen)
- als Basis für die hydraulische Berechnung von Fließgewässern und deren Modellierung

- der Lösung von Aufgaben im Rahmen der gewässerkundlichen Statistik und Extremwertanalyse
- der Aufstellung und Pflege von Abflusskurven

Ein Blick in die Vergangenheit zeigt, dass man schon sehr früh damit begonnen hat, das Wasser und seine Bewegung messtechnisch zu erfassen. Bereits im alten Ägypten wurden zur Zeit der Pharaonen besondere Messapparate für die Registrierung von Wasserständen gebaut, die sogenannten Nilometer. Mit ihnen war es möglich, die jährlichen Nilanschwellungen zu beobachten. Hatte der Wasserstand eine bestimmte Höhe erreicht, wurde die Nachricht im ganzen Land bekannt gegeben. Sie war für die Ernteerträge von großer Bedeutung und wurde mit Spannung erwartet (OTT-Messtechnik 1998, S. 24). Die Nilometer gelten heute als Grundsteine der Hydrometrie. Die Kenntnis abfließender Wassermengen war auch in der Antike von grundlegender Bedeutung für die Bewirtschaftung und Verteilung des verfügbaren Wasserdargebotes. Perser, Inder, Römer, Griechen, Chinesen, alle hatten seinerzeit wasserbauliche Anlagen und Wasserleitungen und betrieben Wasserwirtschaft. Zu den bedeutendsten Bauwerken des antiken Roms zählten vier Aquädukte, die erste Leitung (Aqua Appia) erhielt die Stadt bereits 442 v. Chr. (Müller 1903, S. 2).

Im 17. Jahrhundert entstand in Italien die wissenschaftliche Hydraulik und kein Geringerer als Leonardo da Vinci kann als Urheber einer systemischen Hydraulik bezeichnet werden (Müller 1903, S. 3). In seinen Niederschriften vertrat er stets die Grundsätze analytisch, empirischer Methoden. Es ist überliefert, dass er zum Zwecke der Ermittlung der Geschwindigkeit fließender Gewässer als Erster mit Hilfe von durch Fäden untereinander verbundenen Wachskügelchen die Methode der Doppelschwimmer anwendete (ebd.). Auch der Naturforscher Galileo Galilei bemühte sich um die Förderung der Hydraulik und einer seiner Schüler, Benedetto Castelli, veröffentlichte 1628 das erste wissenschaftliche Werk über Hydraulik „Della misura dell’aque cerrenti“, zu Deutsch „Über die Messung fließender Gewässer“ (ebd.).

Heute, in Zeiten, in denen Auswirkungen des Klimawandels auch in Deutschland immer sichtbarer werden, mehren sich extreme Ereignisse wie Niedrigwasserperioden oder lokale Starkregen: In den vergangenen Jahren haben Starkregen und Überschwemmungen wie in Braunsbach und Simbach 2016 oder in der Eifel im Juli 2021 mit großen Zerstörungspotential und vielen Toten oder die Trockenperioden 2018 bis 2020 und 2022 mit enormen wirtschaftlichen Einbußen für die Land- und Forstwirtschaft, Binnenschifffahrt und Industrie davon Zeugnis gegeben (Schäuser und Baumgarten 2024, S. 89). Sie zeigen, wie wichtig eine intensive Erforschung der Auswirkungen und Risiken des Klimawandels infolge von Wassermangel oder Wasserüberschuss unter Berücksichtigung der damit verbundenen Folgen für Wasserqualität und Biodiversität in aquatischen Ökosystemen ist (ebd.). Eine qualifizierte Forschung benötigt eine solide Datenbasis. Daher kommt der zeitnahen Erfassung der Abflüsse in den Fließgewässern eine Schlüsselrolle zu. Sie ist aber ebenso grundlegende Voraussetzung für das Management von Extremereignissen und die Lösung verschiedenster wasserwirtschaftlicher Fragestellungen in Echtzeit.

1.2 Wie oft wird der Abfluss gemessen?

Eine Orientierung zum notwendigen Umfang der Messungen gibt die Pegelvorschrift, Anlage D, Richtlinie für das Messen und Ermitteln von Abflüssen und Durchflüssen aus dem Jahr 1991 (Pegelvorschrift, Anlage D 1991, S. 1.1). Demnach sind Messungen wie folgt erforderlich:

- mindestens alle drei Monate
- monatlich an den Pegeln, bei denen der Wasserstand veränderlichen Einflüssen ausgesetzt ist (z. B. infolge von Pflanzenwachstum im Messquerschnitt während der Vegetationsperiode)
- zusätzlich mehrere Messungen in Zeiten mit geringer Wasserführung (Niedrigwasserperioden) oder erhöhter Wasserführung (Hochwasserereignisse)
- kurz nach und vor der Entfernung von Wasserpflanzen aus dem Messquerschnitt (Entkrautung) und Beräumung von Flussabschnitten
- nach Hochwässern an Messtellen, bei denen aufgrund der Beschaffenheit der Gewässersohle das Flussbett zu morphologischen Veränderungen neigt.

Die Frage nach der Häufigkeit durchzuführender Messungen lässt sich also pauschal nicht beantworten, da viele Faktoren und Fragen dabei eine Rolle spielen. Ist ausreichend Personal vorhanden? Welche Messgeräte stehen zur Verfügung? Wie viele Messstellen müssen betreut werden?

In der Veröffentlichung zum Erfassen, Auswerten und Verwalten von Durchflussmessungen mit Software Q aus dem Jahr 1998 gehen die Autoren bereits von einer geschätzten Anzahl von 5000 bis 10.000 jährlich durch deutsche Wasser- und Umweltbehörden und Verbände ausgeführten Abflussmessungen aus (Adler et al. 1998, S. 518). Die Tendenz ist steigend und ihre Zahl dürfte sich heute durch die Verfügbarkeit einer breiten Palette moderner ADCP-Messtechnik (siehe Abschn. 5.5) um ein Vielfaches vergrößert haben.

1.3 Was versteht man unter einem Fließgewässer?

Der Begriff Fließgewässer ist ein Sammelbegriff, welcher alle oberirdischen Binnengewässer umfasst, in denen sich ständig oder auch nur zeitweise fließendes Wasser befindet (z. B. Bäche, Gräben, Flüsse, Ströme). Der Abfluss aus dem Einzugsgebiet versorgt sie bis zur Mündung mit Wasser. Die aufgrund des Fließgefälles vorhandene potentielle Energie wird zu einem kleineren Teil für den eigentlichen Fließvorgang, zu großen Teilen jedoch für die Überwindung des Fließwiderstandes (innere und äußere Reibungskräfte) benötigt. Darin begründen sich letztlich Erosion und Geschiebetransport. Im Online-Lexikon der Geographie (<https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/fliessgewaesser/2519>) erfolgt eine Einteilung der Fließgewässer nach der Größe des Durchflusses (Tab. 1.1).

Tab. 1.1 Beispiel für die Einteilung von Fließgewässern (nach: Fließgewässer – Lexikon der Geographie auf spektrum.de)

Mittlerer Durchfluss [m^3/s]	Bezeichnung des Fließgewässers
≤ 20	Bach
20–200	Kleiner Fluss
200–2000	Großer Fluss
> 2000	Strom

1.4 Welche Messgeräte und -verfahren kommen für die Abflussmessung zum Einsatz?

Für den gewässerkundlichen Routinemessbetrieb steht gegenwärtig eine Vielzahl an Messgeräten und Messmethoden für die Abflussmessung in Fließgewässern zur Verfügung. Darunter sind einerseits die klassischen, seit Jahrhunderten bewährten Messinstrumente wie Messflügel und Schwimmer in Kombination mit dem traditionellen Lotrechtenverfahren. Andererseits gibt es die modernen, hochgenauen und zeitsparenden Geräte wie akustische Doppler oder Radarsensoren.

Alle haben ihre spezifischen Anwendungsbereiche, ihr Vor- und Nachteile, ihre Besonderheiten und Eigenarten, ihre Messunsicherheiten. Kein Gerät ist absolut universell. Deswegen muss der Einsatz des jeweiligen Gerätes oder der gewählten Messmethode immer wieder gut überlegt und den besonderen lokalen Messbedingungen angepasst werden.

Eine Übersicht der aktuell im hydrologischen Messalltag gebräuchlichsten Geräte und Methoden zur Abflussmessung gibt Abb. 1.1.

Wie in Abb. 1.1 ersichtlich, gibt es nur eine Möglichkeit, die Abflussmenge direkt zu messen: Die Gefäßmessung, bei welcher alles abfließende Wasser in einem Behälter aufgefangen wird (siehe Abschn. 5.6.5). Alle anderen Messgeräte werden für die indirekte Messung benutzt. Das bedeutet, es werden Geschwindigkeitsinformationen an einzelnen Messpunkten oder integrierend über einzelne Messlotrechten, Messebenen bzw. den gesamten Fließquerschnitt gewonnen und anschließend für die Abflussberechnung nach verschiedenen Modellansätzen benutzt.

1.5 Wie groß ist die Messunsicherheit bei Abflussmessungen?

Unter der Messunsicherheit versteht man die Abweichung des gemessenen Wertes vom wahren Wert. Messungen sind immer mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, deren Ursache entweder systematischer oder zufälliger Natur ist. Ziel muss es demnach sein, diese Abweichungen während des Messvorganges so gering wie möglich zu halten.

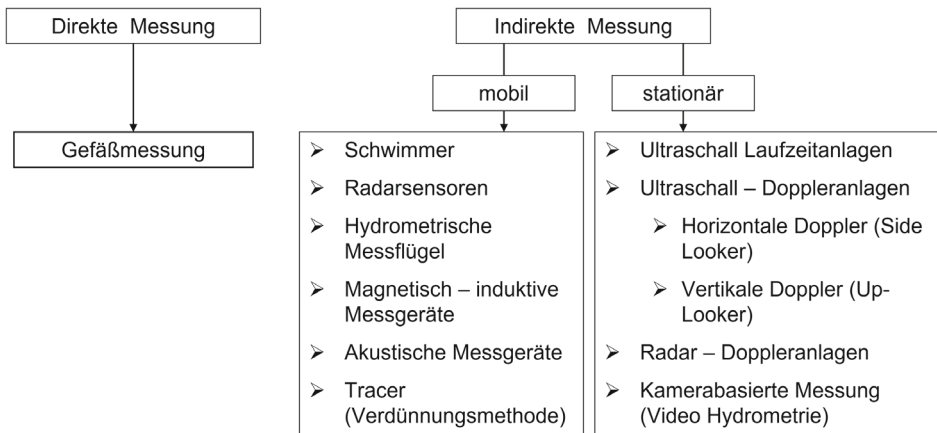


Abb. 1.1 Übersicht der aktuell gebräuchlichsten Geräte und Methoden zur Abflussmessung in Fließgewässern

Eine Abflussmessung besteht aus vielen einzelnen Arbeitsschritten (z. B. Vorbereiten der Messung, Messdurchführung, Auswertung etc.). Jeder dieser Schritte kann fehlerbehaftet sein und Abweichungen hervorrufen. Im Leitfaden zur Hydrometrie des Bundes und der Länder – Pegelhandbuch von 2018 (Pegelhandbuch 2018, S. B-1 f.) – werden systematische Abweichungen und zufällige Abweichungen wie folgt charakterisiert:

Systematische Abweichungen

- sind bedingt durch die zum Einsatz gebrachte Messmethode bzw. das verwendete Messverfahren
- treten bei gleichen Messbedingungen immer mit demselben Betrag und gleichem Vorzeichen auf
- sind bei Messungen, welche unter gleichen Messbedingungen durchgeführt und wiederholt werden, nicht identifizierbar
- werden nicht verringert, indem man mehr Messungen durchführt
- können vermieden oder ausgeglichen werden, wenn ihre Ursachen bekannt sind
- können einen zeitlichen Gang aufweisen und damit wie zufällige Abweichungen erscheinen.

Zufällige Abweichungen

- bilden die Unsicherheit einer Messung
- werden durch unregelmäßige Einflüsse hervorgerufen
- sind nicht vorhersehbar und reproduzierbar
- können bei Wiederholung der Messung unter gleichen Bedingungen erkannt werden

- lassen sich durch Wahl und Ausführung des Messverfahrens begrenzen bzw. verringern, aber nicht ausschließen
- heben sich durch Verlängerung der Messzeit oder Wiederholung der Messung im Mittel auf.

Die Messunsicherheit wird in der Hydrometrie allgemein durch Berechnung der einfachen Standardabweichung angegeben. Es gibt immer mehr Messgeräte, die während der Messung die Rohdaten aufzeichnen und vor Ort die Standardabweichung berechnen und anzeigen. Damit ist eine direkte Qualitätskontrolle an der Messstelle möglich.

Tab. 1.2 fasst eine Auswahl an Ursachen für die Entstehung von Abweichungen bei der Durchflussermittlung aus Messungen zusammen.

Ausführliche und detaillierte Informationen zu Messunsicherheiten bei der Strömungsmessung in offenen Gerinnen können dem Leitfaden zu Messunsicherheit in der Hydrometrie (HUG) entnommen werden (DIN EN ISO 25377:2024-02 (D)).

Tab. 1.2 Abweichungen der Durchflussermittlung aus Messungen (verändert nach Leitfaden zur Hydrometrie des Bundes und der Länder – Pegelhandbuch 2018, S. B-3)

Entstehung der Abweichung	Art der Abweichung	Mögliche Ursachen der Messunsicherheit
Messverfahren/ Messmethode	Zufällig und systematisch	Vielfältige Ursachen, abhängig vom gewählten Messverfahren
Messgerätekalibrierung	Systematische Abweichung	Z. B. veraltete Flügelgleichung, verschobener Nullpunktoffset, nicht berücksichtigte Leitfähigkeit bei akustischen Geräten
Ausführung der Messung	Zufällig und systematisch	Ungenauere Zeitmessung, ungenaue Tiefenmessung, ungeeignete Punktmessmethode, fehlerhafte Abstandmessung beim Lotrechtenverfahren
Bestimmung des korrespondierenden Wasserstandes	Zufällig und systematisch	Ungenügende Berücksichtigung von Änderungen des Wasserstandes während einer Messung
Auswertefehler	Zufällig und systematisch	Falsche Annahmen für die Geschwindigkeitsverteilung bzw. den Messquerschnitt

1.6 Typische Abflussbedingungen in Fließgewässern

1.6.1 Langsam fließende Gewässer

Langsam fließende Gewässer sind häufig im Flachland anzutreffen. Sie besitzen ein sehr geringes Sohl- bzw. Wasserspiegelgefälle. In extremen Situationen kann es nur wenige Zentimeter auf mehrere Kilometer Flusslänge betragen. Auch in Stauhaltungen trifft man sehr oft kleine Fließgeschwindigkeiten an, da der Wasserstand zwischen den Pegeln an beiden Enden der Haltung nur um einige Zentimeter abfällt. Als Beispiel betrachten wir einen Flussabschnitt an der Havel-Oder-Wasserstraße (HOW). Die Wasserspiegeldifferenz zwischen den Pegeln Borgsdorf und Spandau Oberpegel betrug am 10.04.24 um 14:00 Uhr lediglich 3,4 cm, was bei einer Fließstrecke von 19,54 km einem Wasserspiegelgefälle von 1,74 ‰ entspricht. Der am Pegel Borgsdorf gemessene Abfluss betrug zur selben Zeit 22,6 m³/s. (<https://www.pegelonline.wsv.de/gast/pegeltabelle>). Bei einer angenommenen Gewässerbreite von 50 m und einer Wassertiefe von 4 m ergibt sich am Fließquerschnitt in Borgsdorf eine Fließgeschwindigkeit von rund 11 cm/s, eine Fließgeschwindigkeit, die nur wenige cm/s über der Anlaufgeschwindigkeit von Messflügeln liegt.

Langsam fließende Gewässer sind anfällig gegenüber starken Windgradienten, welche die Wasseroberfläche bei entsprechender Windrichtung zeitweilig gegen die eigentliche Fließrichtung bewegen können. So entsteht der Eindruck, das Gewässer würde rückwärts fließen. Feldmessungen sollten daher gerade unter diesen Bedingungen stets zügig und ohne Unterbrechung durchgeführt werden.

Im Winter frieren langsam fließende Gewässer schneller zu, was in-situ Messungen erschwert oder gar unmöglich macht (Abb. 1.2). Kontinuierliche Messanlagen erfordern unter diesen Umständen eine Korrektur der durchströmten Querschnittsfläche für die Abflussberechnung, da die Eisbedeckung den Querschnitt reduziert.

Langsam fließende Gewässer, welche in der Vegetationsperiode langanhaltender Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind, neigen zu verstärkter Bildung von Pflanzenwachstum im Fließquerschnitt. Dieses wiederum hat zur Folge, dass keine, über einen längeren Zeitraum gültige Abflusskurve aufgestellt werden kann und alternative Verfahren wie z. B. das ETA-Verfahren (siehe Abschn. 2.1.3) für die Lösung dieser Aufgabe herangezogen werden müssen. Die geringen Fließgeschwindigkeiten erfordern zudem eine Messtechnik, die in der Lage ist, kleine Geschwindigkeiten mit hoher Genauigkeit zu messen (z. B. akustische Messgeräte). Letztendlich können sich Fließgewässer mit geringer Fließgeschwindigkeit bei starker Sonneneinstrahlung schneller erwärmen, was dazu führt, dass der Sauerstoffgehalt im Gewässer sinkt. Gelöster Sauerstoff aber ist ein lebenswichtiges Element für tierische und pflanzliche Organismen. Der negative Effekt einer Sauerstoffreduzierung äußert sich nicht selten in lokalen Fischsterbeereignissen, die vor allem dann auftreten, wenn infolge von Starkregen erhöhte Schmutzfrachten aus der Kanalisation in die Gewässer eingetragen werden.

Abb. 1.2 Langsam fließendes Gewässer im Winter mit Eisbildung



1.6.2 Schnell fließende Gewässer

Schnell fließende Gewässer findet man überall dort, wo ein großes Gefälle der Gewässersohle für hohe Fließgeschwindigkeiten sorgt. Hierzu zählen Gebirgsbäche ebenso wie große Flüsse, die aus den Bergen kommend ihren Weg zur Mündung suchen. In ihnen herrscht eine mehr oder weniger starke Turbulenz, was für eine gute Durchmischung des Wasserkörpers und für langzeitstabile Strömungsprofile sorgt. Schnell fließende Gewässer können aber auch herausfordernd werden, wenn die Wasseroberfläche hochgradig turbulent ist (Abb. 1.3). Unter diesen Bedingungen wird es schwierig, mit Radargeräten die Oberflächengeschwindigkeit zu messen, akustische Verfahren anzuwenden oder gar eine Messung im Wasser stehend mit an der Stange geführten Messgeräten auszuführen. Alternative Methoden wie z. B. eine Tracermessung (siehe Abschn. 5.4) müssen in Erwägung gezogen werden.

1.6.3 Schiffbare Gewässer

Bei schiffbaren Gewässern spricht man in der Regel von Wasserstraßen, welche für die Schifffahrt zugänglich und befahrbar sind. Zudem müssen sie bestimmte Voraussetzungen erfüllen, wie beispielsweise ausreichende Wassertiefe, ausreichend Platz für das Manövrieren und eine ausreichende Breite, damit Schiffe sicher aneinander vorbeifahren können. Diese Gewässer können sowohl Flüsse als auch Kanäle umfassen und ebenso durch Seen verlaufen (Abb. 1.4).

Große Schiffe, die für den Personen- oder Güterverkehr unterwegs sind, haben sehr häufig einen entsprechenden Tiefgang und sorgen bei der Fahrt für eine mehr oder weniger nachhaltige Störung der Geschwindigkeitsverteilung im Fließquerschnitt eines

Abb. 1.3 Schnell fließendes Gewässer mit hoher Turbulenz



Abb. 1.4 Schiffbares Fließgewässer



Fließgewässers. Zudem können sie bei der Passage von kontinuierlich messenden Ultraschallanlagen die Ausbreitung von Schallsignalen im Wasser behindern und in der Folge Messwertausfälle oder Fehlmessungen verursachen.

Auch das Schraubenwasser hinter dem Schiffsantrieb sorgt für Probleme bei Systemen, die mit Ultraschall arbeiten, da die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall im Wasser für das entstehende Wasser-Luft-Gemisch nicht zutrifft. Bei In-situ-Messungen, zum Beispiel mit Messflügeln, sollte in Absprache mit den zuständigen Behörden (z. B. Wasserstraßen- und Schifffahrtsämter) nach Möglichkeit für den Zeitraum der Messung eine Schifffahrtssperre erwirkt werden. Ist das nicht möglich, sind Schiffspassagen im Messprotokoll mit Uhrzeit zu vermerken, um die spätere Datenprüfung zu erleichtern.

1.6.4 Staugeregelte Gewässer

Staugeregelte Fließgewässer sind Gewässer, bei denen Wasserstand und Abfluss mit Hilfe von Regelbauwerken (Stauwerke bzw. Stauanlagen) nach einem vorgegebenen Stauziel geregelt werden (Abb. 1.5). Stauanlagen können aus einem oder mehreren Segmenten bestehen und sowohl manuell als auch automatisch betrieben werden.

Die Stauregelung dient der Lösung verschiedenster wasserwirtschaftlicher Aufgabenstellungen wie beispielsweise der Verbesserung der Schifffahrtsverhältnisse (Erhöhung der Tauchtiefen), der Wasserkraftnutzung, der Kühlwasserentnahme für industrielle Zwecke oder der Wasserbereitstellung für landwirtschaftliche Bedürfnisse.

Staugeregelte Fließgewässer weisen im angestauten Bereich, dem sogenannten Stauraum, erhöhte Wasserstände und geringere Fließgeschwindigkeiten auf als im unbeeinflussten Flussabschnitt. Zudem gibt es bei stark geschiebeführenden Gewässern das Problem der Verlandung des Stauraumes. Infolge der Verringerung des Wasserspiegelgefälles und der damit einhergehenden Abnahme der Sohlengeschwindigkeit bleibt das von oberhalb mitgeführte Geschiebematerial im Bereich der Staugrenze liegen und die mitgeführten Schwebstoffe setzen sich ebenfalls mit geringer werdender Fließgeschwindigkeit ab.

Besteht das Stauziel in der Einhaltung eines bestimmten Wasserstandes, so können am Regelbauwerk unterschiedliche Durchflüsse bei gleichem Wasserstand auftreten. Umgekehrt kann ein definierter Durchfluss mit unterschiedlichen Wasserständen einhergehen. In beiden Fällen kann man keine Wasserstands- / Durchflussbeziehung (siehe Abschn. 2.1.3) im Oberwasser aufstellen. Daher werden an Stauanlagen oft im Oberwasser kontinuierlich messende Systeme eingebaut (z. B. Ultraschall-Laufzeit-Anlagen oder Ultraschall-Doppler-Anlagen) oder der Abfluss wird direkt mit Hilfe der Stauanlage über mehr oder weniger komplexe Wehrformeln bestimmt. Die dabei verwendeten Randparameter variieren je nach Verschlussart und Art der Über- bzw. Unterströmung (z. B. Wasserstand am Ober- und Unterpegel, die Wehrklappenstellung etc.). Sind an

Abb. 1.5 Staugeregeltes Fließgewässer



der Staustufe mehrere Teilabflüsse vorhanden (z. B. Turbinendurchfluss, Wehrdurchfluss und Durchfluss über die Fischtreppe bei Wasserkraftanlagen) so müssen alle Teilabflüsse einzeln bestimmt werden.

1.6.5 Gewässer mit Rückströmung

Rückströmung kann in einem Fließgewässer u. a. auftreten, wenn:

- a) ein Streckenabschnitt innerhalb einer Stauhaltung vorliegt und das Wasser nach einem Schleusungsvorgang infolge der dabei entstehenden Schwall- und Sunkwellen wie in einer Badewanne hin- und herschwappt.
- b) der Querschnitt des Fließgewässers in Fließrichtung unregelmäßig ist und so z. B. infolge von Sohlaufhöhungen eine partielle Fließumkehr stattfindet (Abb. 1.6).
- c) das Wasserspiegelgefälle sehr gering und damit die Fließgeschwindigkeit sehr langsam ist und örtlich auftretende Windgradienten entgegen der Fließrichtung eine Strömungsumkehr der oberen, unter dem Wasserspiegel liegenden Schicht bewirken.
- d) Salzgradienten im Gewässer vorhanden sind und es zu einer geschichteten Strömung mit unterschiedlichen Fließrichtungen kommt (z. B. im Mündungsbereich eines Binnengewässers, welches in den Bodden fließt).
- e) Rückstau und Strömungsumkehr in einem Nebengewässer dadurch entstehen, dass das Hauptgewässer Hochwasser führt und somit einen freien Zufluss des Nebengewässers verhindert.
- f) es sich um ein Tidegewässer handelt.

Abb. 1.6 Fließgewässer mit partieller Rückströmung



Bei Gewässern mit Rückströmung sind In-situ-Abflussmessungen Momentaufnahmen, die sich nicht durch eine eindeutige Beziehung zwischen Wasserstand und Durchfluss (Abflusskurve) abbilden lassen, da bei gleichem Wasserstand unterschiedliche Abflusssituationen vorherrschen können. Aus diesem Grund soll es vermieden werden, an Messstellen mit Rückströmung zu messen (ausgenommen an Tidegewässern, an denen eine komplette Strömungsumkehr erfolgt). Sind kontinuierliche Messsysteme an Gewässern mit Rückströmung installiert, müssen entsprechende Korrekturen erfolgen oder eben gewisse Messunsicherheiten in Kauf genommen werden. Messsysteme kommen an ihre Grenzen, sobald nur ein Teilbereich des Fließquerschnittes von Rückströmung betroffen ist (siehe Punkte b. bis d.).

1.6.6 Gewässer mit Vegetation im Fließquerschnitt

Fließgewässerquerschnitte können durch das Wachstum von Algen, Krautfahnen und andere Wasserpflanzen eingeengt werden (Abb. 1.7).

Vorhandene Vegetation im Fließquerschnitt hat einerseits Auswirkungen auf die Wahl des Messgerätes, andererseits auf die anschließende Verwendung der Messergebnisse. Wenn sich Krautfahnen oder ähnliches im Messquerschnitt befinden, können weder Messflügel noch akustische Messgeräte sinnvoll benutzt werden. Erstere werden in ihrer mechanischen Funktion beeinträchtigt, da die Pflanzen die Drehung der Flügelschaukel behindern. Akustische Geräte hingegen benötigen eine ungehinderte Ausbreitungsmöglichkeit des Ultraschalls unter Wasser. Trifft der Schall auf Pflanzen, wird dessen Ausbreitung behindert und das Ultraschallsignal erfährt eine Dämpfung (siehe Abschn. 3.3). Das ist der Grund, warum in verkrauteten Gewässern alternativ magnetisch-induktive Sensoren zur Anwendung kommen.

Abb. 1.7 Fließgewässer mit Vegetation im Fließquerschnitt

