

# Doppler-Effekt und kontinuierliche Durchflussmessung in offenen Gerinnen

Horizontale Ultraschall-Doppler-Geräte und Radargeschwindigkeitssensoren nutzen den Doppler-Effekt zur kontinuierlichen Messung der Fließgeschwindigkeit in offenen Gerinnen. Modernste Signalverarbeitungstechniken sowie die Verfügbarkeit von Metadaten sichern und überwachen die Qualität der Messwerte und ermöglichen so eine zuverlässige Durchflussbestimmung rund um die Uhr, auch in Extremsituationen.

Stefan Siedschlag

## 1 Einleitung

Eine zeitgemäße operative Hydrologie erfordert zunehmend die schnelle und zuverlässige Verfügbarkeit gemessener Wasserstände und Durchflüsse. Nichts lässt sich bekanntermaßen bewirtschaften, steuern oder regeln, was man nicht messen kann. Mit Beginn der Nutzbarmachung des Doppler-Effektes zur mobilen Strömungsmessung mit ADCP-Geräten (Acoustic Doppler Current Profiler) im Jahr 1982 [1] begann eine neue Epoche im hydrometrischen Zeitalter. Der Entwicklung mobiler Sensoren folgten sehr bald erste stationäre Varianten (Horizontal-ADCP bzw. Side-Looker), die sich je nach Hersteller in Bauart, Frequenz, Reichweite und Signalauswertungstechnik unterscheiden. Ein in jüngster Zeit weltweit zu beobachtender Trend in der Hydrometrie ist der Einsatz von Radar-Doppler-Sensoren. Diese messen berührungslos die Fließgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche und sind in der Lage, auch bei Hochwasser mit hohem Schwebstoff- und Geschiebeanteil zuverlässige Messwerte zu erzeugen. Die fachgerechte Auswahl von Geräten und Messstellen wird heute durch eine Vielzahl internationaler Standards, nationaler Regelwerke sowie umfangreiche Fachliteratur unterstützt [2], [3], [4], [5], [6].

## 2 Kontinuierliche Messung mit H-ADCP und Radarsensoren

### 2.1 Der Doppler-Effekt

Der Doppler-Effekt beschreibt die Veränderung der Wellenlänge von Schall- oder elektromagnetischen Wellen für den Fall, dass sich Quelle und Empfänger der Wellen relativ zueinander bewegen. Seine Entdeckung geht auf den österreichischen Mathematiker und Physiker Christian Doppler (1803-1853) zurück, welcher den Effekt erstmalig im Jahre 1842 dokumentierte. Ein vielzitiertes praktisches Beispiel ist das Martinshorn eines Krankenwagens. Je nachdem, ob sich das Fahrzeug nähert oder entfernt hört man einen höher oder tiefer werdenden Ton. D. h. die von einem bewegten Sender erzeugten Wellen erfahren eine Frequenzverschiebung. Das gilt auch

für Wellen eines Reflektors, der sich in Bezug auf Sender und Empfänger bewegt.

### 2.2 Einsatz von H-ADCP

#### Messprinzip

H-ADCP Geräte werden am Ufer montiert und senden gebündelte Ultraschallstrahlen waagrecht in das Gewässer hinein. Hierfür benutzen sie zwei Ultraschallwandler, welche je nach Gerätebauart konkav oder konvex angeordnet sind. Nach dem Senden schalten die Geräte auf Empfang. Ein Teil des Schallimpulses wird von den im strömenden Wasser enthaltenen Partikeln (Schwebstoffen, Sedimenten, Organismen) reflektiert und kehrt mit einer Frequenzverschiebung zum Wandler zurück. Aus der gemessenen Frequenzverschiebung wird die Partikelgeschwindigkeit berechnet. Unter der Annahme, dass sich die Partikel mit der Geschwindigkeit des Wassers bewegen, kann letztendlich dessen Fließgeschwindigkeit bestimmt werden. Geschwindigkeitsinformationen lassen sich je nach Hersteller und Gerät aus einem oder mehreren Messvolumen (Messzellen) gewinnen. Deren Größe wird vom Anwender definiert und hängt unter anderem von der verwendeten Sendefrequenz der Ultraschallwandler ab. Gerätetechnisch bedingt (Umschaltzeit zwischen Senden und Empfang, Eigenschwingung der Sensoren) hat die erste Messzelle einen Mindestabstand vom Ultraschallwandler (Blanking). Aus diesem Bereich werden keine gültigen Messwerte erhalten. Seine Größe ist ebenfalls geräteabhängig.

#### Kompakt

- Die Nutzbarmachung des Doppler-Effektes hat die Entwicklung der hydrometrischen Messtechnik bahnbrechend revolutioniert.
- Akustische-Doppler-Strömungsmessgeräte und Radar-Doppler-Geschwindigkeitssensoren gehören heute zu den tragenden Säulen bei der kontinuierlichen Bestimmung von Durchflüssen in offenen Gerinnen.

### Physikalische Randbedingungen

Um eine auswertbare Dopplerfrequenz zu erhalten, müssen ausreichend Partikel im Wasser vorhanden sein, was in der Regel in natürlichen Gewässern immer der Fall ist. Unbedingt zu vermeiden sind Störungen des akustischen Signals (Interferenzen) infolge von Schallreflektionen an den Rändern des Wasserkörpers (Wasserspiegel, Gewässersohle, Uferbereiche, Brückentpfeiler, felsiger Untergrund usw.). Demzufolge ist die Einhaltung eines ausreichenden Verhältnisses von Gewässertiefe zu Gewässerbreite notwendig. Die Werte hierfür schwanken je nach Hersteller und Gerät. ISO 15 769 [3] empfiehlt einen konservativen Wert von 1:10 (1 m Wassertiefe bei 10 m Reichweite), weist aber gleichzeitig darauf hin, dass Werte von 1:20 und besser in der Praxis möglich sind.

### Hydraulische Randbedingungen

Wichtig ist es, auf eine gute Anströmung der Messstelle zu achten, was bedeutet, sie in einem geraden Gewässerabschnitt mit uferparalleler Strömung und gleichmäßiger Geschwindigkeitsverteilung anzuordnen. Zudem ist darauf zu achten, dass Zu- und Ablaufstrecke einen gleichbleibenden Fließquerschnitt und konstante Rauheitsverhältnisse aufweisen. H-ADCP sind ungeeignet

- bei starken Änderungen des Querschnittes in Fließrichtung (Querschnittserweiterung oder -verengung),
- für unvollständig durchströmte Querschnitte (Messquerschnitte mit Stillwasserzonen und Rückströmungsbereichen),
- für Messquerschnitte mit ständiger Sohlenveränderung (Auflandung und/oder Erosion),
- in verkrauteten Messquerschnitten,
- in Flusskrümmungen.

In jedem Fall empfiehlt es sich, vor Einbau eines H-ADCP-Sensors die Messstelle einer gründlichen Evaluierung zu unterziehen, um spätere Probleme beim Betrieb zu vermeiden. Kriterien zur Bewertung von Messstellen können ISO 15 769 [3] entnommen werden.

### Installation und Betrieb

H-ADCP werden in einer Tiefe montiert, die es erlaubt, den Messbereich dort anzuordnen, wo die Strömung gut durchmischt ist und die Fließgeschwindigkeit sich in der Nähe des Maximums befindet. Die maximale Reichweite ist unter anderem abhängig von der verwendeten Messfrequenz der Wandler. So können z. B. 600-kHz-Ott-SLD-Geräte (SLD: Side Looking Doppler) bis zu 80 m Reichweite erzielen, 2-MHz-Geräte aber nur 10 m. In der Regel bietet die entsprechende Bediensoftware des H-ADCP die Möglichkeit, während der Installation mit Hilfe eines Range-Checks die Reichweite zu überprüfen, Hindernisse im Schallstrahl zu identifizieren sowie den Sensor optimal zu positionieren und zu parametrieren (z. B. Größe der Messzellen, Größe des Blanking-Bereiches). Die Sensorhalterung muss eine stabile, robuste Montage gewährleisten und ggf. Schutz vor Beschädigung durch Treibgut sowie Vandalismus bieten. Kabelführungen erfolgen prinzipiell in Schutzrohren. Während des Betriebs kann die Qualität der Messdaten durch Aufzeichnung der Signalstärken der

einzelnen Messzellen überwacht werden. Ist die Stärke der zurückkehrenden Echos niedriger als das Eigenrauschen des Gerätes, können keine sinnvollen Geschwindigkeiten mehr ermittelt werden und der Messbereich muss ggf. angepasst werden. Der Ott-SLD bietet zusätzlich die Möglichkeit, einen Schiffsfilter zu aktivieren, um Fehlmessungen durch vorbeifahrende Schiffe zu erkennen und zu kompensieren. Die Wartungsaktivitäten beschränken sich auf eine bedarfsweise durchzuführende Sensorreinigung sowie die Nachkontrolle von Kabelführung, Befestigung und Ausrichtung des Gerätes (insbesondere nach Extremereignissen).

### Anwendungsgebiete

H-ADCP werden hauptsächlich für hydrologische Anwendungen eingesetzt. So hat z. B. das Landesamt für Umwelt Brandenburg bereits 2009 begonnen, schrittweise ein H-ADCP-Messnetz zum Online-Monitoring des Durchflusses an den wichtigsten Pegelstationen aufzubauen und betreibt inzwischen über 20 Ott-SLD in den verschiedenen Einzugsgebieten. Anwendungen gibt es ebenso im Bereich der Bewässerung, der Wasserkraft und der Trinkwasserversorgung. Die Wasserbetriebe von Athen beispielsweise benutzen Ott-SLD-Geräte seit 2013, um die Zuführung des Rohwassers aus den Reservoiren in den Bergen zu überwachen (**Bild 1**). Die Aufzählung ließe sich beliebig fortsetzen.

### 2.3 Einsatz von Radarsensoren zur Messung der Oberflächengeschwindigkeit

#### Messprinzip des Ott SVR 100

Die Funktionsweise des Oberflächengeschwindigkeitsradars beruht auf dem Echoprinzip elektromagnetischer Wellen. Diese werden mit einer Frequenz von 24,2 GHz von einem gegen den Wasserspiegel geneigten Sensor ausgesendet. Ist die Wasseroberfläche rau und in Bewegung, kehren die Echosignale mit einer verschobenen Frequenz zum Sender zurück (Doppler-Effekt). Aus dieser kann die Geschwindigkeit an der Wasseroberfläche bestimmt werden. Die Größe der Messfläche hängt von der Höhe des Sensors über dem Wasserspiegel und seiner Neigung ab.



**Bild 1:** Ott SLD montiert an senkrechter Uferwand eines Kanals



**Bild 2:** Ott-SVR-100-Durchflussmesssystem am Pegel Aiblingen

### Messstellenevaluierung

Zuverlässige Messergebnisse bedingen eine sorgfältige Messstellenauswahl. Zwingend nötig ist ein rauer Wasserspiegel, der genügend Energie zum Sensor zurückreflektiert. Zudem sollte sich die Messstelle in einem geraden Gewässerabschnitt mit uferparalleler Strömung und stabiler Position der maximalen Oberflächengeschwindigkeit befinden. Mesststellen mit Makroturbulenzen, Hindernissen, instabiler Sohle und Vegetation im Messquerschnitt sind zu meiden.

### Installation und Betrieb

Die Installation erfolgt an einer Brücke oder einem Kragarm. Der Ott SVR 100 verfügt über eine kardanische Aufhängung mit eingravierter Winkelskalierung, was Montage und Ausrichtung wesentlich erleichtert. Der Sensor wird dort fixiert, wo er den Bereich der maximalen Oberflächengeschwindigkeit erfasst.

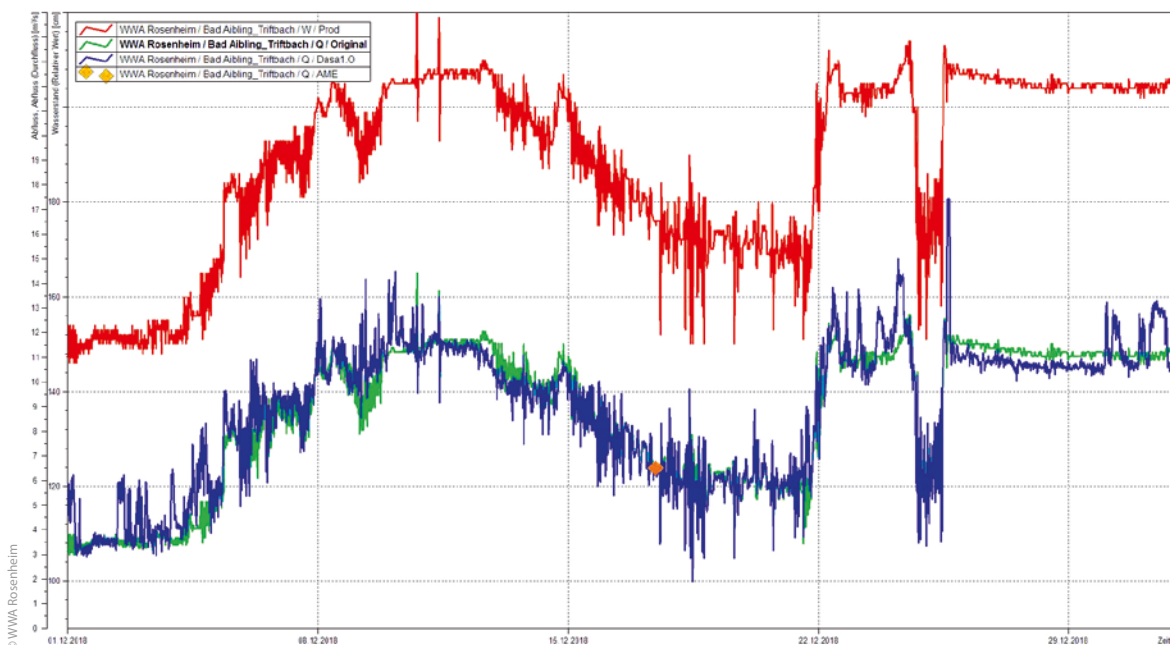
Eine Ausrichtung gegen die Strömung sowie die Aktivierung des internen Richtungsfilters gewährleisten, dass nur die auf den Sensor zukommende Strömung akzeptiert wird. Damit können Fehlmessungen bei Niederschlagsereignissen vermieden werden. Im Messbetrieb liefert der Ott SVR 100 Zusatzinformationen zur Qualität der gemessenen Werte. Zu jedem Geschwindigkeitswert stellt der interne Neigungssensor den Neigungswinkel bereit. Ein Vibrationssensor misst Erschütterungen und gibt einen Vibrations-Index aus (0 = keine Vibration bis 3 = sehr starke Vibration). Vibrationen können durch Wind und Verkehr entstehen und die Messung beeinträchtigen. Zusätzlich wird eine Status-Information zur Signalstärke erzeugt. Diese kennzeichnet die Qualität des Messsignals (0 = gutes Signal ... 3 = sehr schlechtes Signal).

### Anwendungsbeispiel Pegel Bad Aiblingen Triftbach

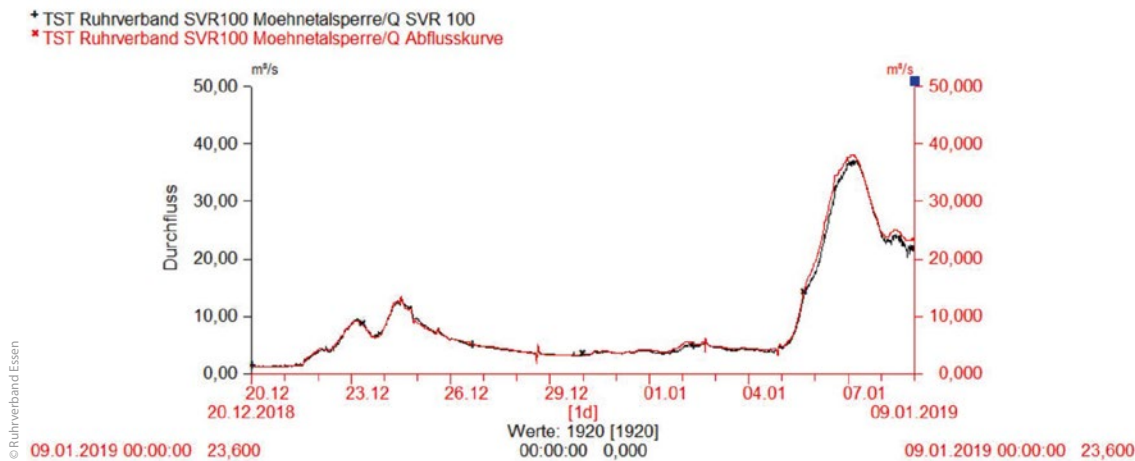
Erste praktische Erfahrungen zum Einsatz des Ott SVR 100 im hydrologischen Routinemessbetrieb liegen seit August 2018 beim Wasserwirtschaftsamt Rosenheim vor. Das komplette Messsystem besteht aus Radar-Wasserstandssensor OTT RLS, Geschwindigkeitssensor Ott SVR 100 und dem Stationsmanager Ott netDL 1 000. Die Montage der Sensoren erfolgte an einem Kragarm (**Bild 2**). Die Messwerte werden im 15-min-Takt erfasst. Die Genauigkeit der Ergebnisse wird vom Betreiber durch In-situ-ADCP-Messungen überprüft. **Bild 3** zeigt die Ganglinien für W (rote Linie), Q aus der W/Q-Beziehung (grüne Linie) und Q ermittelt mit dem Ott SVR 100 (blaue Linie). Durchgeführte ADCP-Vergleichsmessungen sind mit einem orangen Karo markiert.

### Anwendungsbeispiel Pegel Völlinghausen

Im Rahmen einer Teststellung prüfte der Ruhrverband Essen seit Oktober 2018 die Eignung des Ott SVR 100 zur Durchflussmessung an seinen Fließgewässern. Der erste Test fand am Pegel Völlinghausen statt. Der Sensor wurde dort an einer Brücke mon-



**Bild 3:** Ganglinienvergleich am Pegel Aiblingen



**Bild 4:** Vergleich der Durchflussganglinien am Pegel Völlinghausen

tiert. Die Durchflussmessergebnisse wurden mit der Abflusskurve verglichen (**Bild 4**). Die Ergebnisse sprechen für sich.

### 2.4 Von der Geschwindigkeit zum Durchfluss

Sowohl H-ADCP als auch Oberflächenradarsensoren messen lokale Fließgeschwindigkeiten (Indexgeschwindigkeit). Kombiniert mit einem Wasserstandssensor und einem intelligenten Datensammler kann der Durchfluss gemäß Kontinuitätsgleichung als Produkt aus durchströmter Querschnittsfläche und mittlerer Fließgeschwindigkeit berechnet werden. Letztere wird über wasserstandabhängige, messstellenspezifisch bestimmte Korrekturbeiwerte ermittelt. Die Qualität der Durchflussdaten steht somit in direktem Zusammenhang mit der Qualität der Kalibrierung der Messstelle. Ott unterstützt diesen Arbeitsschritt mit der Software Ott Prodis2. Nähere Informationen können der Literatur entnommen werden [7].

### 3 Fazit

Durch die Nutzbarmachung des Doppler-Effektes für die Entwicklung hydrometrischer Geräte verfügen wir heute über ein breites Spektrum von Sensoren zur kontinuierlichen Messung des Durchflusses in Flüssen und Kanälen. Um dem steigenden Bedarf an zuverlässigen Echtzeitdaten auch zukünftig gerecht zu werden, ist neben der Weiterentwicklung vorhandener Sensorik unter Nutzung modernster Technologien vor allem auch die Fortsetzung des intensiven fachlichen Disputs zwischen Anwendern und Geräteherstellern erforderlich.

Stefan Siedschlag

#### Doppler effect and continuous discharge measurements in rivers and open channels

Horizontal acoustic Doppler current profiler and surface velocity radar sensors are using the Doppler effect to measure flow velocities in rivers and open channels continuously. State of the art signal processing techniques as well as the availability of meta data guarantee extensive quality assurance and quality control of measured data. Thus, reliable discharge measurements are available 24/7, even in extreme flow situations.

### Autor

**Dipl.-Ing. Stefan Siedschlag**

Ott Hydromet GmbH

Ludwigstr. 16

87437 Kempten

stefan.siedschlag@otthydromet.com

### Literatur

- [1] Teledyne RD Instruments (Hrsg.): Acoustic Doppler Current Profiler - Principles of operation - A practical primer. P/N 951-06069-00, 2011.
- [2] Morgenschweis, G.: Hydrometrie - Theorie und Praxis der Durchflussmessung in offenen Gerinnen. 2. A. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag, 2018.
- [3] Norm ISO 15 769: Hydrometry - Guidelines for the application of acoustic velocity meters using the Doppler and echo correlation methods. 2010.
- [4] Länderarbeitsgemeinschaft Wasser; Bundesminister für Verkehr (Hrsg.): Pegelvorschrift, Anlage D - Richtlinie für das Messen und Ermitteln von Abflüssen und Durchflüssen. 1991.
- [5] Rantz, S. E. et al.: Measurement and Computation of Streamflow. Volume 1. Measurement of Stage and Discharge. Geological Survey Water Supply Paper 2175. Washington: United States Government Printing Office, 1982.
- [6] Levesque, V. A.; Oberg, K. A.: Computing discharge using the velocity index method. In: U. S. Geological Survey Techniques and Methods (2012), 3-A23.
- [7] Siedschlag, S.: Von der Geschwindigkeit zum Durchfluss - softwaregestützte Kalibrierung kontinuierlich arbeitender Durchflussmesssysteme in offenen Gerinnen. In: WasserWirtschaft 102 (2012), Heft 3, S. 15-19.

 SpringerProfessional.de

Doppler-Effekt



Lemmer, B.; Bahr, B.; Piccolo, R.: Der Doppler-Effekt. In: Quirky Quarks. Berlin Heidelberg: Springer, 2017.  
[www.springerprofessional.de/link/10865918](http://www.springerprofessional.de/link/10865918)

Bannwarth, H.; Kremer, B. P.; Schulz, A.: Mechanik. In: Basiswissen Physik, Chemie und Biochemie. 4. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Spektrum, 2019.  
[www.springerprofessional.de/link/16573030](http://www.springerprofessional.de/link/16573030)