

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Teufel, Michael**

## **Durchflussmessen mit Ultraschall in Kanälen und Rohrleitungen**

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

**Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103837>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Teufel, Michael (2006): Durchflussmessen mit Ultraschall in Kanälen und Rohrleitungen. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Strömungssimulation im Wasserbau (Flow Simulation in Hydraulic Engineering). Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 32. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 381-389.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# Durchflussmessen mit Ultraschall in Kanälen und Rohrleitungen

Dr. Michael Teufel

## 1 Kurzfassung

Mittels Ultraschall werden seit vielen Jahren Geschwindigkeits- und Durchflussmessung in Wasser realisiert. Dabei kommen Reflektions- und Transmissionsverfahren zum Einsatz, neu hier vorgestellt ist die Kombination von beidem. Von den Reflektionsverfahren werden Doppler-, Pulsdoppler- und Kreuzkorrelationsverfahren vorgestellt, die jeweils aufwändiger aber damit auch genauer werden. Pulsdoppler- und Korrelationsverfahren erlauben die Bestimmung von Geschwindigkeitsprofilen mit einer Auflösung ab ca. 0,3 m, das Korrelationsverfahren bereits ab ca. 0,01 m; die Eindringtiefen betragen bis zu einigen Metern. Das bekannteste Transmissionsverfahren ist das Laufzeit-Differenz-Verfahren, das bis zu 100 m (und darüber hinaus) eingesetzt werden kann. Reflektionsverfahren sind auf Verunreinigungen im Wasser angewiesen; Transmissionsverfahren arbeiten am besten in sauberem Wasser. Durch eine Auswahl, bzw. eine Kombination der Verfahren kann somit ein breiter Anwendungsbereich von Klarwasser bis Abwasser abgedeckt werden. Darüber hinaus werden 2-dimensionale Netzmessungen ermöglicht, die eine akzeptiert hohe Genauigkeit gewährleisten.

### 1.1 Abstract

Since several years ultra sonic devices are used to determine velocity profiles and volume flow rates in water. Ultra sonic is used in reflection mode as well as in transmission; new is the combination of both. Doppler, pulse Doppler and cross correlation method are explained as reflection mode with increasing effort but with higher accuracy, too. Pulse Doppler and cross correlations method offer the determination of velocity profiles with spatial resolutions of about 0.3 m, correlation method already starts at about 0.01 m; the measuring path may reach several meters. In transmission mode transit time devices are well known reaching distances up to 100 m (sometimes higher). Reflection devices

require pollution in the water, in opposite to transmission devices that prefer clean water condition. Having the choice of both modes or its combination ultra sonic devices may work in the complete range from clean water up to waste water. New is the possibility to offer 2 dimensional velocity measurements in a grid, well accepted to give highest accuracies.

## **1 Einleitung**

Die Akustik wird seit vielen Jahren erfolgreich zur Geschwindigkeits- und Durchflussmessung genutzt. Diese Messungen sind wesentlich bei Wasserströmungen in großen voll- und teilgefüllten Rohren, in offenen Gerinnen und bei sämtlichen freien Oberflächengewässern, da nur so eine zuverlässige Erfassung des Durchflusses und der Strömung möglich ist. Eine gesamtheitliche Betrachtung, die in der Regel mit numerischen Modellen durchgeführt wird, basiert dabei auf diesen Messungen. Zum Teil dienen diese als Startparameter; sie werden aber natürlich auch zur Verifizierung der Berechnungen eingesetzt.

Erste Messsysteme, die den Dopplereffekt nutzen, arbeiteten mit kontinuierlich Ultraschall abstrahlenden Sendern und separaten Empfängern. Kapitel 2 beschreibt diese Dopplerverfahren. Das Kapitel 3 stellt Verbesserungen vor, die durch ein gepulstes Verfahren orts aufgelöste Geschwindigkeitsmessung erlaubt. Eine bessere Genauigkeit und deutlich höhere Ortsauflösung erhält man, wenn man die Kreuzkorrelation einsetzt. Dieses Verfahren wird im Kapitel 4 aufgegriffen. Mit dem Laufzeitdifferenzmessverfahren kann man über große Abstände Geschwindigkeitsmessungen realisieren, dieses wird in Kapitel 5 aufgegriffen. Durch eine Kombination von Laufzeitdifferenz und Kreuzkorrelation ergeben sich neue Möglichkeiten zur Erfassung von Geschwindigkeitsfeldern und damit zur Bestimmung des Durchflusses.

### **2.1. Doppler Verfahren**

Gängige Doppler Systeme arbeiten mit kontinuierlich arbeitenden Ultraschallsendern. Sie erlauben dabei keine räumliche Zuordnung des Doppler-frequenzverschobenen Ultraschallsignals; deshalb ist es nur sehr eingeschränkt möglich, über stochastische Betrachtungen Aussagen über ein vorliegendes Geschwindigkeitsprofil zu treffen. Zur Durchflussmessung bei freien Oberflächen ist darüber hinaus eine zusätzliche Bestimmung der Wasserhöhe nötig, um den exakten Strömungsquerschnitt zu bestimmen.

Wie die folgende Abbildung 1 zeigt, befinden sich im Dopplersensor zwei Piezokristalle; einer agiert als Sender, der andere als Empfänger. Der Sender strahlt kontinuierlich Schallwellen mit einer Frequenz  $f_1$  unter einem festen Winkel  $\alpha$  in das Wasser. Dabei treffen Ultraschallwellen auf Partikel oder Blasen, die sich mit der Geschwindigkeit  $v$  durch das Schallfeld bewegen. Der Empfänger misst die Dopplerverschobene Frequenz  $f_2$ :

$$f_2 = \frac{f_1 \cdot c}{c - 2 \cdot v \cdot \cos \alpha}$$

Daraus lässt sich die Frequenzverschiebung berechnen, die dann gemessen wird:

$$\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{2 \cdot v \cdot f_1 \cdot \cos \alpha}{c}$$

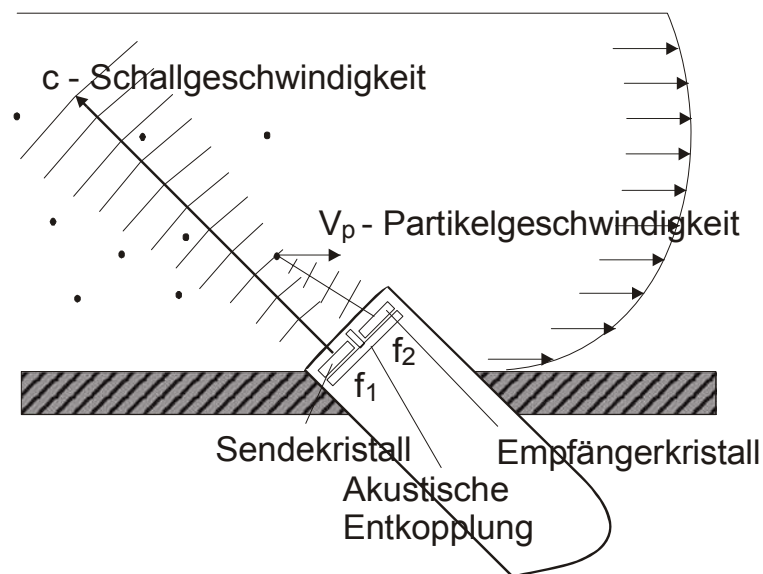


Abbildung 1: Dopplersensor

Die Frequenzdifferenz ist ein lineares Maß für die Bewegungsgeschwindigkeit der Partikel und bei hinreichend kleinen Partikeln repräsentativ für die Strömungsgeschwindigkeit.

Ausgewertet wird die Periodendauer, deren Bestimmung gegenüber der direkten Frequenzmessung den Vorteil hat, auch sehr niedrige Frequenzen, d.h. kleine Strömungsgeschwindigkeiten schnell und zuverlässig erfassen zu können. Die auflaufenden Daten werden gespeichert und einer statistischen Datenauswertung zugeführt. Aus dem Maximum dieser Frequenzverteilung lässt sich der Mittelwert der Frequenzgruppen und die mittlere Geschwindigkeit berechnen. Je nach Partikeldichte und Schallfrequenz können mit dem Dopplerverfahren Eindringtiefen des Schallsignals bis zu 5 m erreicht werden.

## 2.2. Puls Doppler

Das Ultraschall Puls - Dopplerverfahren (ADCP) stellt eine Weiterentwicklung der bekannten Dopplermesstechnik dar. Arbeitet der Sender mit kurzen Ultraschallpulsen, dann kann über die Laufzeit des Pulses eine räumliche Zuordnung erfolgen. In der Regel wird der Sender auch als Empfänger eingesetzt. Mit diesem Aufbau lassen sich minimale räumliche Auflösungen von ca. 0,3 – 0,4 m erreichen. Damit ist dieser Aufbau geeignet, um Geschwindigkeitsprofile und Durchflüsse in größeren Kanälen und anderen Oberflächengewässern zu bestimmen. Auch in vollgefüllten Rohren größerer Nennweite können so gute Ergebnisse erzielt werden.

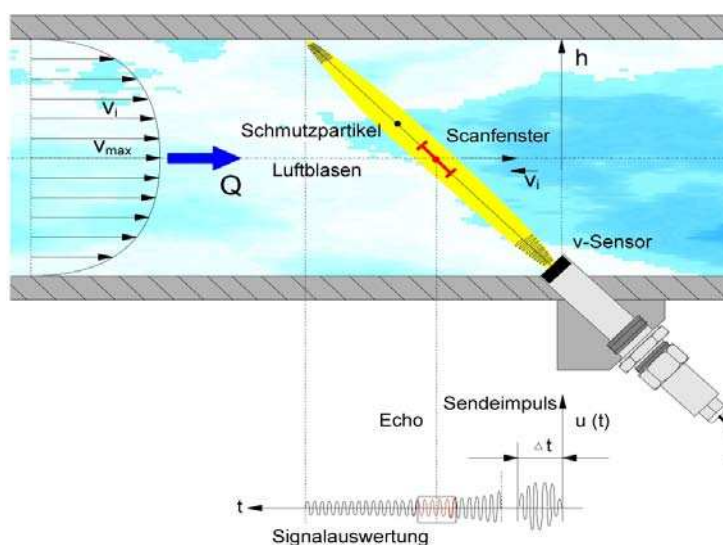


Abbildung 2: Puls – Doppler

In Rohren einer Nennweite unter 1 m setzt man das Pulsdopplerverfahren mit nur einem Messfenster ein. Abbildung 2 zeigt diesen Aufbau.

Durch die Wahl der Sende-/Empfangsfrequenz wird dem Empfangssignal ein definiertes Messfenster zugeordnet, in der Regel die Rohrmitte. Diese Achsengeschwindigkeit lässt sich leicht in die mittlere Geschwindigkeit und damit den Durchfluss umrechnen.

### 2.3. Kreuzkorrelation

Die Kreuzkorrelation ist ein mathematisches Hilfsmittel, das durch die Entwicklung schneller Mikroprozessoren vor allem bei der Datenauswertung und Signalgewinnung Einzug in die Durchflussmessung gefunden hat. Als Durchflussmessverfahren wird es – berührungslos – seit einigen Jahren in mehrphasigen Fluiden eingesetzt. Die Abbildung 3 zeigt auf, wie dieses Verfahren mit Ultraschall genutzt werden kann. Ein Ultraschallgeber sendet einen kurzen Puls aus, dessen Echos in verschiedenen Zeitfenstern gespeichert werden. Dadurch entstehen „Bilder“ räumlich definierter Bereiche. Die Echos eines kurz später ausgesandten Pulses stellen ein „2.-tes Bild“ der gleichen Bereiche dar.

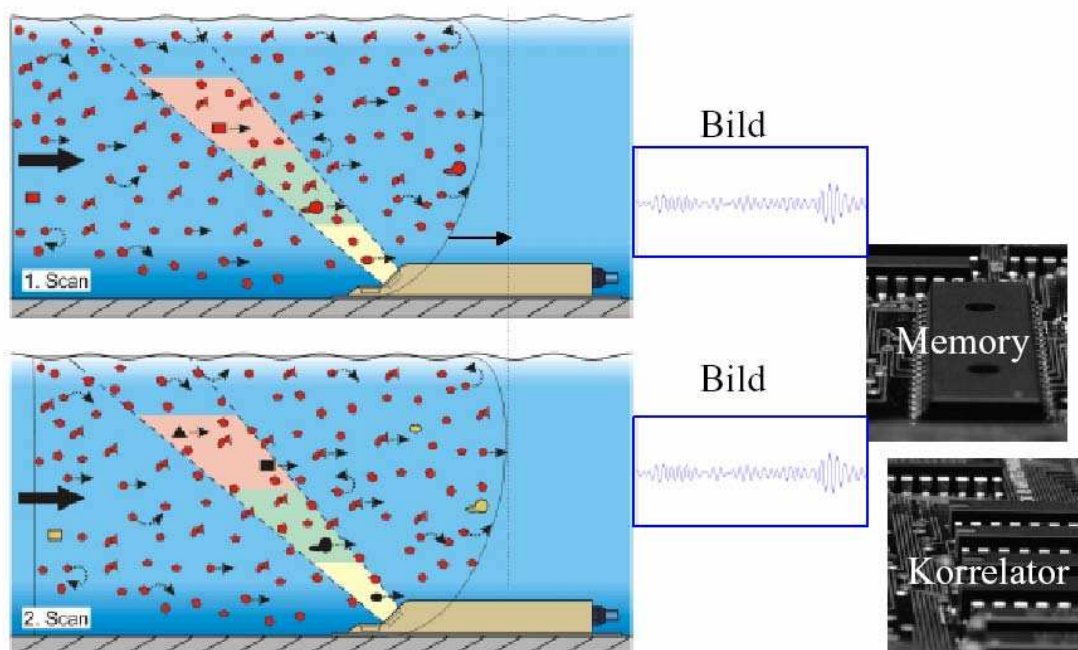
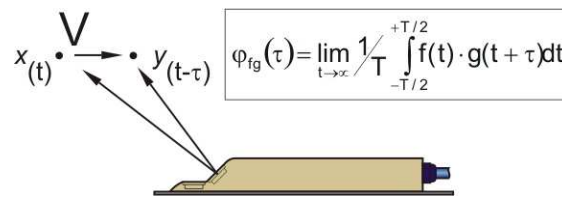


Abbildung 3: Korrelation

Die Korrelation dieser „Bilder“ ergibt eine Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit in diesen Fenstern. Hierzu wird die Korrelationsgrundgleichung



in üblicher Weise digitalisiert

$$\varphi(\Delta T) = \frac{\sum_{i=1}^N f_i \cdot g_i(\Delta T)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N f_i^2 \sum_{i=1}^N g_i^2}} = \frac{\sum_{i=1}^N f_i \cdot g_i(\Delta T)}{N^2}$$

mit  $f$  als digitales 1.-tes „Bild“ und  $g$  als digitales 2.-tes „Bild“.

Mit dem Messaufbau erhält man in bis zu 16 „Fenstern“ Geschwindigkeitsmessungen und damit eine Bestimmung des Geschwindigkeitsprofils. Dieses lässt sich nutzen, um in vollgefüllten Rohren den Durchfluss über die übliche Berechnung der mittleren Geschwindigkeit aus der Pfadgeschwindigkeit z.B. dem Durchmesserpfad zu bestimmen. Der Vorteil ist, dass man zusätzlich zur mittleren Pfadgeschwindigkeit eine Geschwindigkeitsprofilmessung erhält, die im einfachsten Fall zur Beurteilung der „Qualität“ einer Messstelle geeignet ist, mit etwas Aufwand aber auch zur Korrektur des Messwertes herangezogen werden kann.

Mit dem Geschwindigkeitsprofil aus 16 „Fenstern“ lassen sich vor allem aber auch in teilgefüllten Rohren und Kanälen Durchflussmessungen durchführen. Hierzu ist eine zusätzliche Höhenbestimmung des Füllstandes nötig, die durch einen im Sensor integrierten oder einen externen Sensor erfolgen kann; zu sehen in Abbildung 4.

Mit einem Kombisensor wird neben der Fließgeschwindigkeit auch die Fließhöhe ermittelt. Dies geschieht mittels eines Wasser – Ultraschallsensors, der über die Laufzeit eines Ultraschallpulses bis zur Flüssigkeitsoberfläche die Wasserhöhe bestimmt. Die Integration einer Druckdose ist ebenfalls möglich, mit der eine hydrostatische Höhenmessung durchgeführt werden kann. Der Anschluss einer externen Füllstandsmessung stellt eine weitere Möglichkeit dar, die unter bestimmten Bedingungen zu empfehlen ist. Über den Füllstand werden die „Messfenster“ variabel positioniert und in der Größe angepasst. Bei kleinen Fließhöhen reduziert sich die Anzahl dieser „Fenster“.



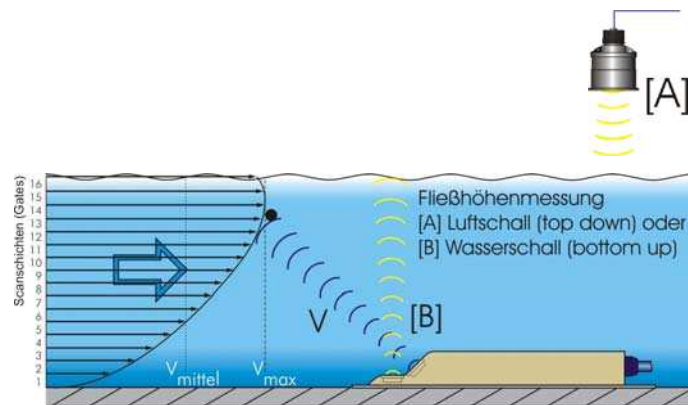


Abbildung 4: Integrierte und/oder externe Höhenmessung

Mit einem zum Puls – Doppler vergleichbaren Sensor kann durch die Kreuzkorrelation zweier nacheinander abgestrahlter Pulse eine viel kleinere Ortsauflösung mit ca. 0,01 m erzielt werden. Im Unterschied zu Dopplersystemen entfällt hier eine Abhängigkeit von der Sendefrequenz, die z.B. durch sich ändernde Temperaturen hervorgerufen wird. Bei Dopplersystemen kann dieser Einfluss signifikante Fehler verursachen. Durch eine präzise Bestimmung des Geschwindigkeitsprofils kann daher das Kreuzkorrelationsverfahren den Durchfluss mit hoher Genauigkeit bestimmen. Dabei kommen experimentelle und theoretische Berechnungen werden dabei durch numerische Untersuchungen ergänzt. Solche Berechnungen sind in Abbildung 5 zu sehen.

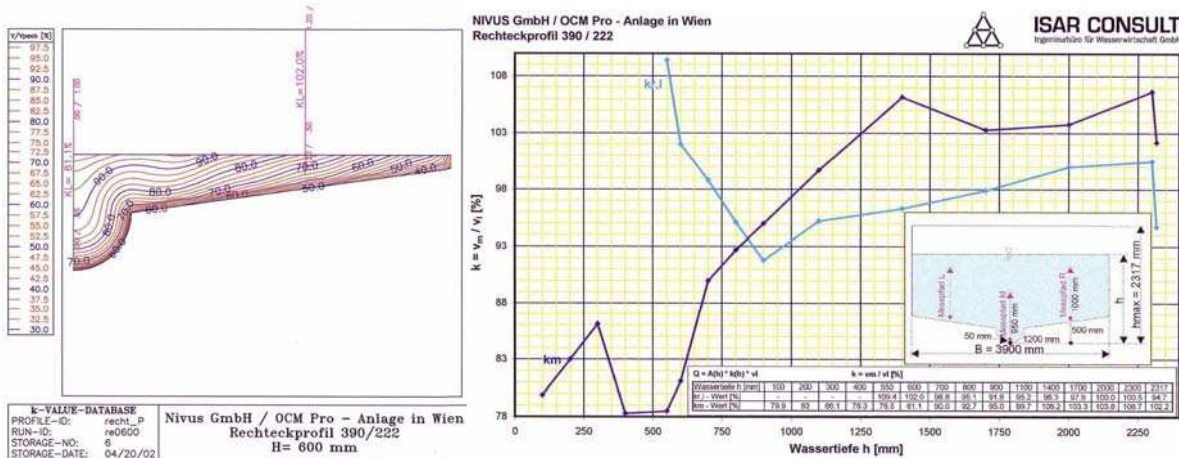


Abbildung 5: Numerische Ergänzungsberechnungen



Das Messverfahren ist als stationäres Gerät OCM *Pro* und mobiles Gerät PCM *Pro* realisiert. An das stationäre Gerät können zur Erhöhung der Genauigkeit mehrere Sensoren gleichzeitig angeschlossen werden. Das mobile Gerät ist batteriebetrieben und energieoptimiert.

## 5. Laufzeitdifferenz

Die vierte Messmethode, die in unserem NivuSonic umgesetzt ist, nutzt den Effekt, dass die Schallausbreitung in Strömungsrichtung (+) schneller erfolgt als gegen (-) sie. Bei Kenntnis des Schallpfadwinkels  $\alpha$  zur Strömungsrichtung und der Pfadlänge  $L$  ergibt sich die mittlere Pfadgeschwindigkeit  $v_m$  zu:

$$v_m = \frac{c^2}{2 \cdot L \cdot \cos \alpha} (t_+ - t_-)$$

Zur Erhöhung der Messgenauigkeit werden dabei mehrere Messpfade realisiert. In Rohren haben sich dabei Mehrpfadssysteme mit bis zu 8 Messpfaden bewährt, die – nach Gauß-Quadratur verteilt und gewichtet – höchste Genauigkeiten bis 0,5 % vom Messwert garantieren. (CEI/IEC 41:1991). Bei offen Kanälen schreibt die EN ISO 6416 den Einbau vor, der eine Durchflussmessung mit hoher Genauigkeiten erlaubt. Im wesentlichen findet dabei eine Aufteilung der durchströmten Querschnittsfläche in die Flächen statt, in denen die Messpfadgeschwindigkeiten die mittlere Geschwindigkeit in diesen Flächen repräsentieren.

Bei geeigneten Sensoren können sämtliche Sensoren, die zur Laufzeitbestimmung dienen, auch zur Geschwindigkeitsprofilmessung per Kreuzkorrelation direkt vor dem jeweiligen Sensor eingesetzt werden. Damit werden erstmals 2-dimensionale Netzmessungen möglich. Die Abbildung 6 soll dieses verdeutlichen.

Die weitere Verarbeitung dieser Messwerte steht noch aus. Sicherlich ist durch die zusätzliche Information eine erhöhte Genauigkeit vor allem bei gestörten Profilen zu erwarten. Die Messgeräte und ihre Spezifikationen können auf unserer Homepage ([www.nivus.de](http://www.nivus.de)) betrachtet werden. Hier werden auch die unterschiedlichen Sensortypen vorgestellt.

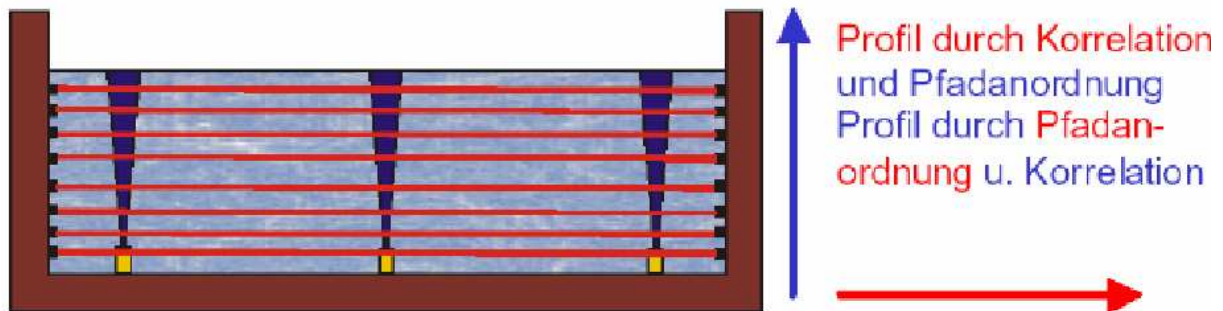


Abbildung 6: Netzmessungen

Stellt man die komplementären Bedürfnisse an Partikelbeladung bzw. Sauberkeit des Wassers für Kreuzkorrelation und Laufzeitdifferenz in Rechnung, dann eröffnet sich mit dieser Kombination ein fast unbeschränktes Einsatzfeld in Wasser angefangen vom Trinkwasser, über sämtliche Oberflächengewässer bis hin zum Abwasser.

**Autoren:**

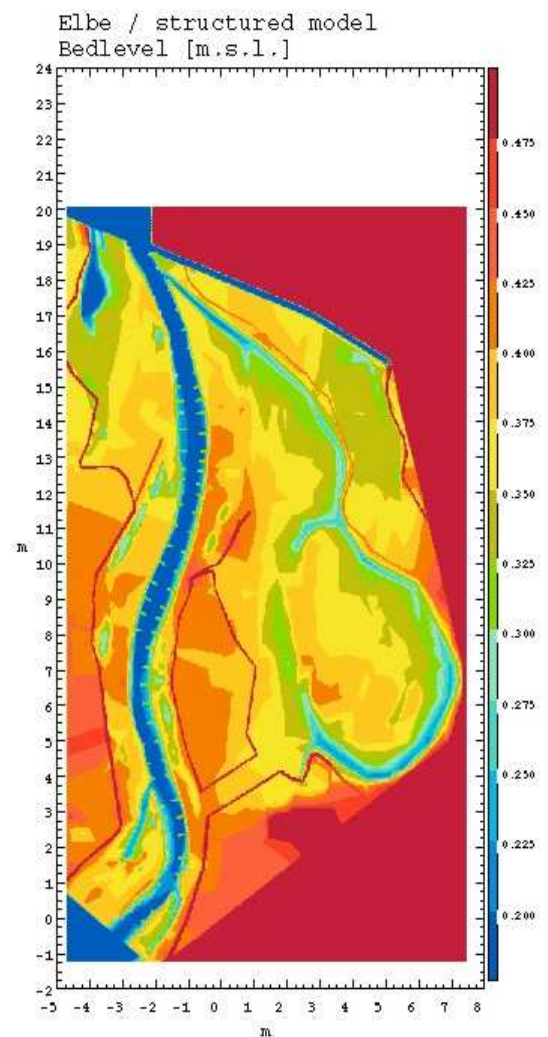
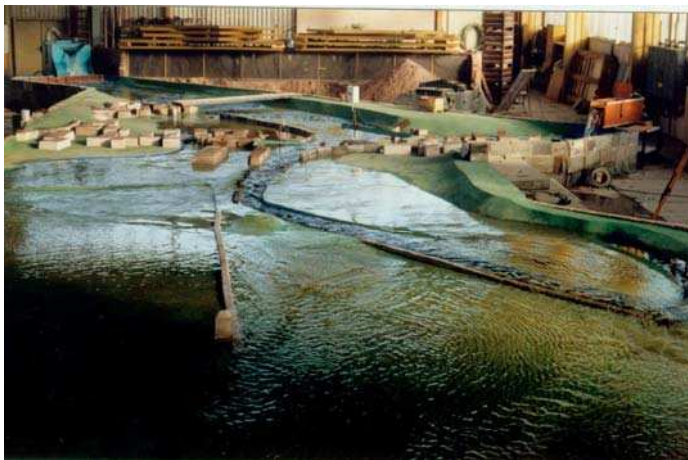
Dr. Michael Teufel;

NIVUS GmbH, , Im Täle 2; 75031 Eppingen

Tel.: 07262 / 919143; Email: [mt@nivus.de](mailto:mt@nivus.de); Internet: [www.nivus.de](http://www.nivus.de)

# iwsö

Institut für Wasserwirtschaft, Siedlungswasserbau und Ökologie



Institut für Wasserwirtschaft, Siedlungswasserbau und Ökologie

Dr.-Ing. Konrad Thürmer  
konrad.thuermer@iwsoe.de

Freiherr-vom-Stein-Allee 5  
99425 Weimar

Themarer Straße 16 c  
98553 Schleusingen

Papitzer Straße 2  
03046 Cottbus