

### Verfahren zur Durchflussmessung: (Quelle: Pegelvorschrift)

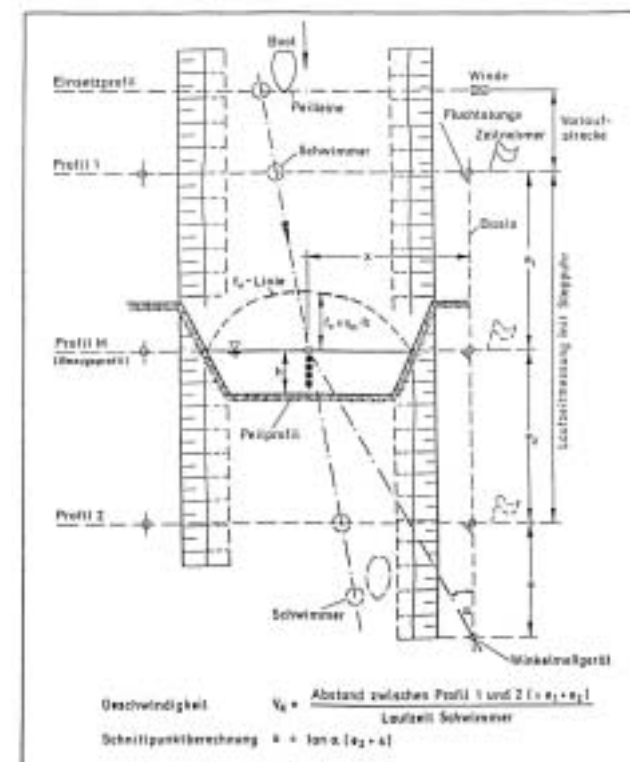
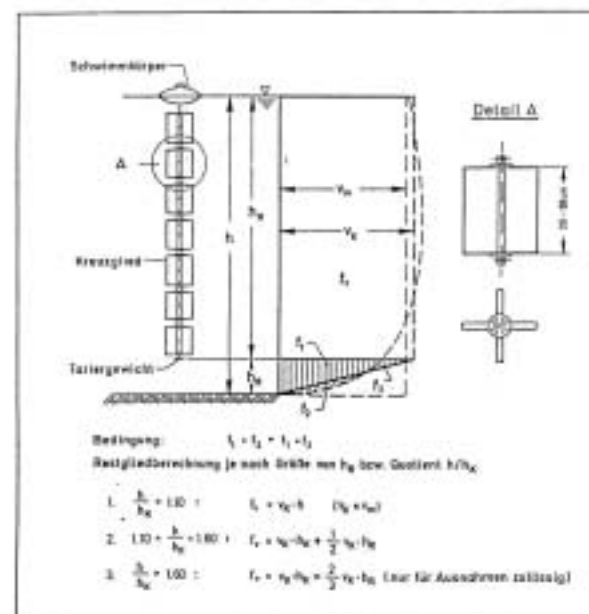
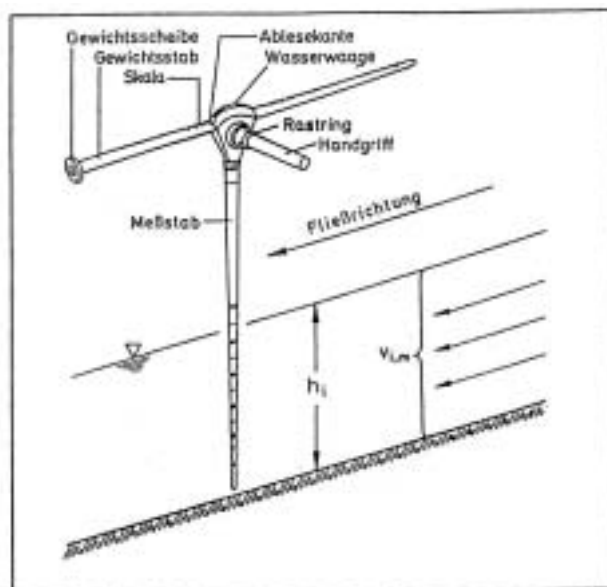
- Mechanische Verfahren
  - Flügelmessung
  - Tauchstab nach Jens
  - Schwimmerverfahren
- Akkustische Verfahren
  - Ultraschallmessung
  - Ultraschall- Doppler Verfahren
- Magnetisch- induktive Verfahren
- Optische Verfahren
  - Stroboskopverfahren
  - VISAB
- Tracerverfahren

Die Wahl des Verfahrens hängt von den Einsatzgebieten ab. Prinzipiell ist das Verfahren zu wählen, das am wirtschaftlichsten die vorgegebenen Genauigkeitsanforderungen erfüllt.

Besonders schwierige Einsatzbedingungen erfordern spezielle Verfahren.

Solche Bedingungen sind gegeben:

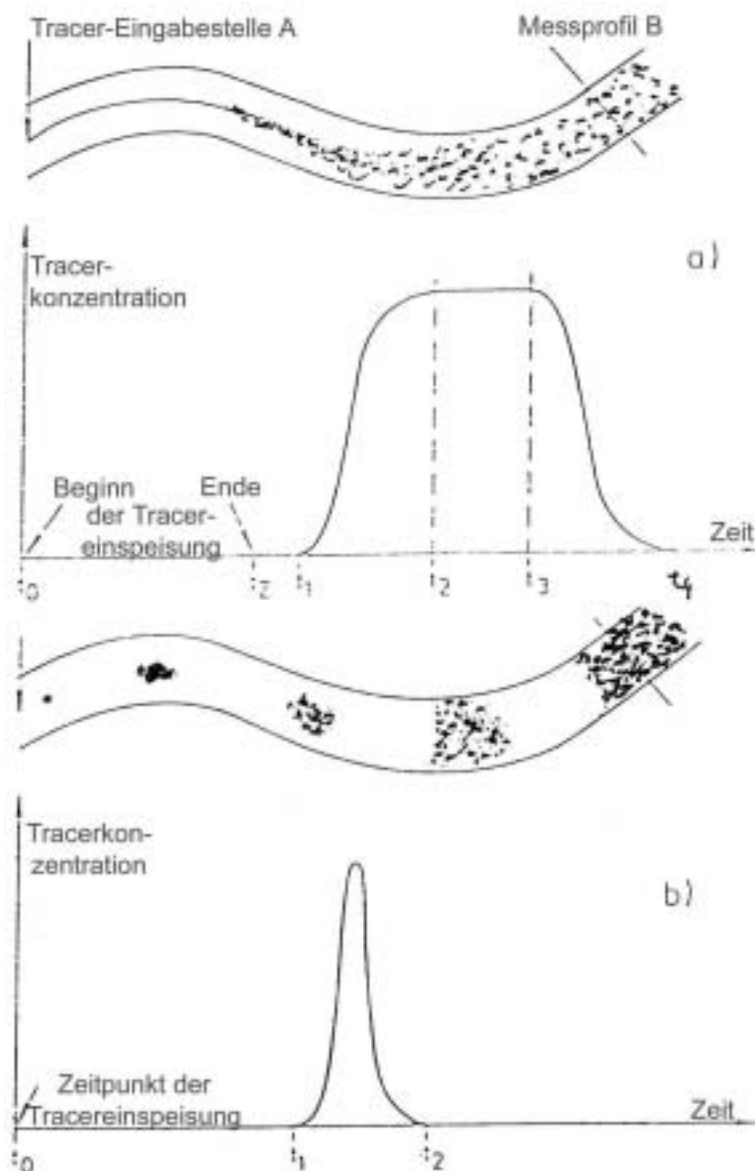
- Wenn keine stabile Wasserstands- Durchflussbeziehung aufgestellt werden kann (Stationaritätsprinzip kann nicht eingehalten werden)
- Bei Gewässern mit starkem Krautwuchs
- Bei sehr hohen Fließgeschwindigkeiten und/ oder turbulentem Fluss
- Bei Gewässern mit ständiger ausgeprägter Veränderung der Profilgeometrie
- Bei Gewässern bei denen sich die Fließrichtung umkehrt (z.B. unter Tideeinfluss)



Durchflussermittlung mit Markierstoffen: (Quellen: Pegelvorschrift; Thamm, Dipl. Arbeit)

Voraussetzungen für die Abflussmessung mit Markierstoffen sind:

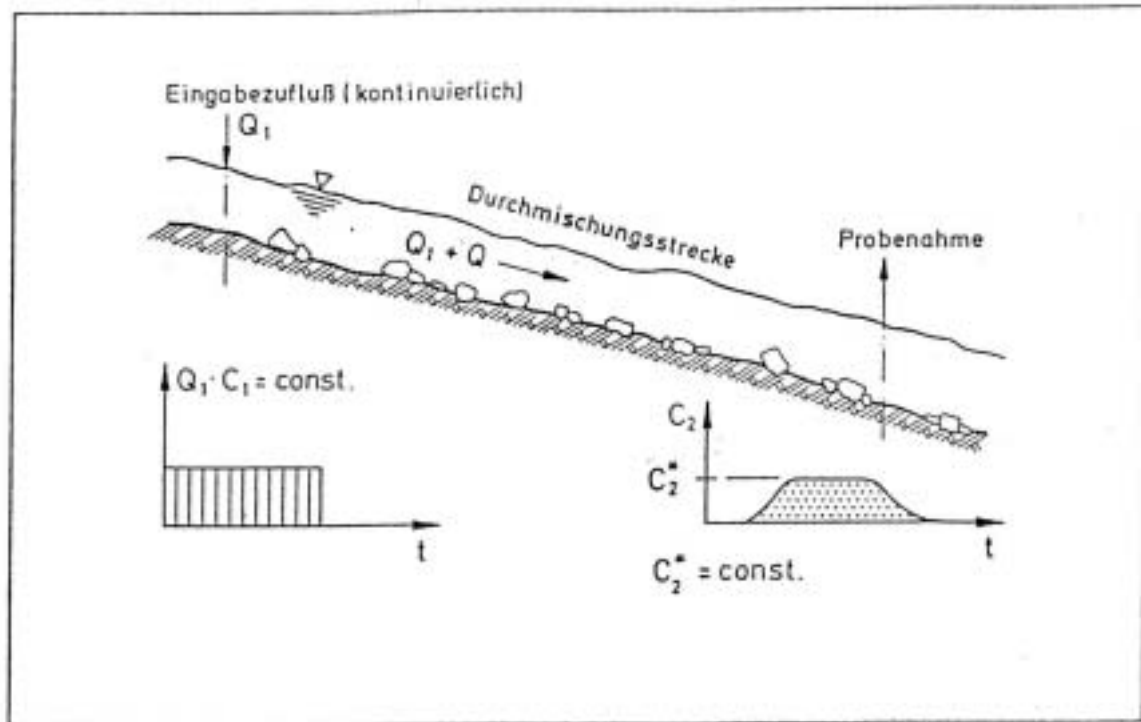
- Konstanter Abfluss über den Messzeitraum
- Keine Änderung der Grundleitfähigkeit während der Messung (z.B. Einleitung von Abwässern)
- Vollständige Durchmischung des Markierstoffes mit dem Gewässer
- Der Markierstoffdurchgang muss eindeutig erfassbar sein (Menge)



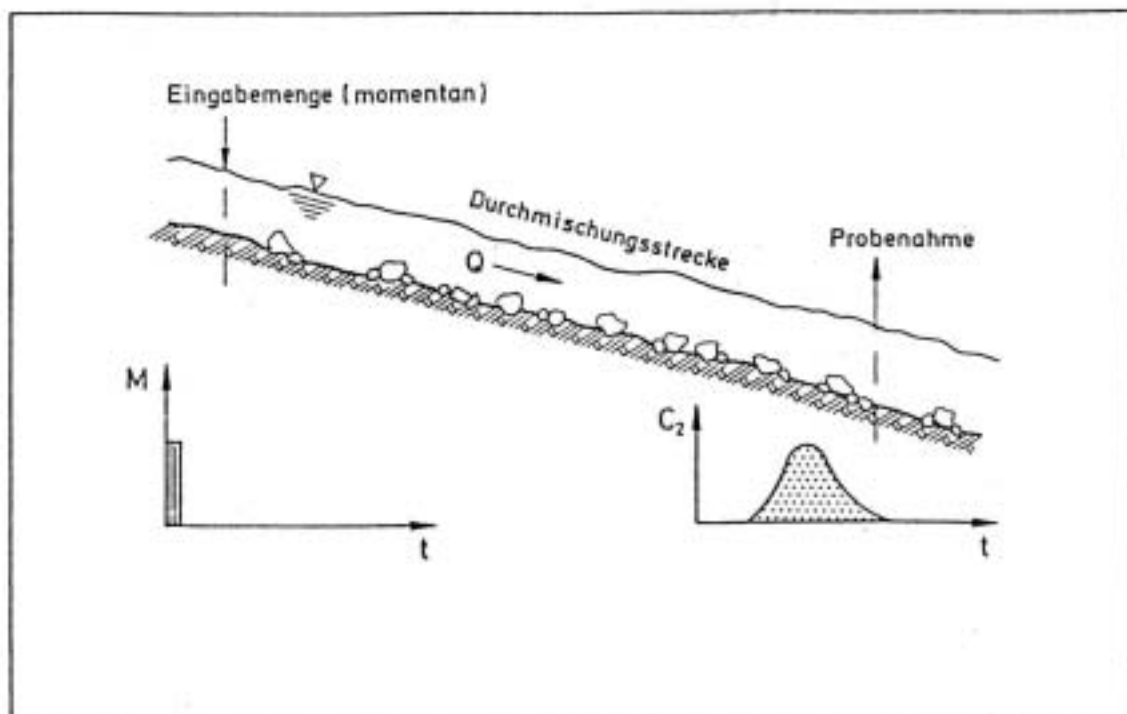
Es können zwei methodische Ansätze unterschieden werden:

1.) Markierstoffinjektion mit konstanter Rate (Plateaumethode).

- Die Dauer der Einspeisung muss deutlich länger sein als die Dauer des Konzentrationsanstiegs an der Messstelle.



2.) Momentane Markierstoffinjektion (Integrationsmethode)



Durchflussberechnung bei konstanter Injektion (Plateaumethode):

$$Q = Q_1 \frac{C_1}{C_2} - Q_1$$

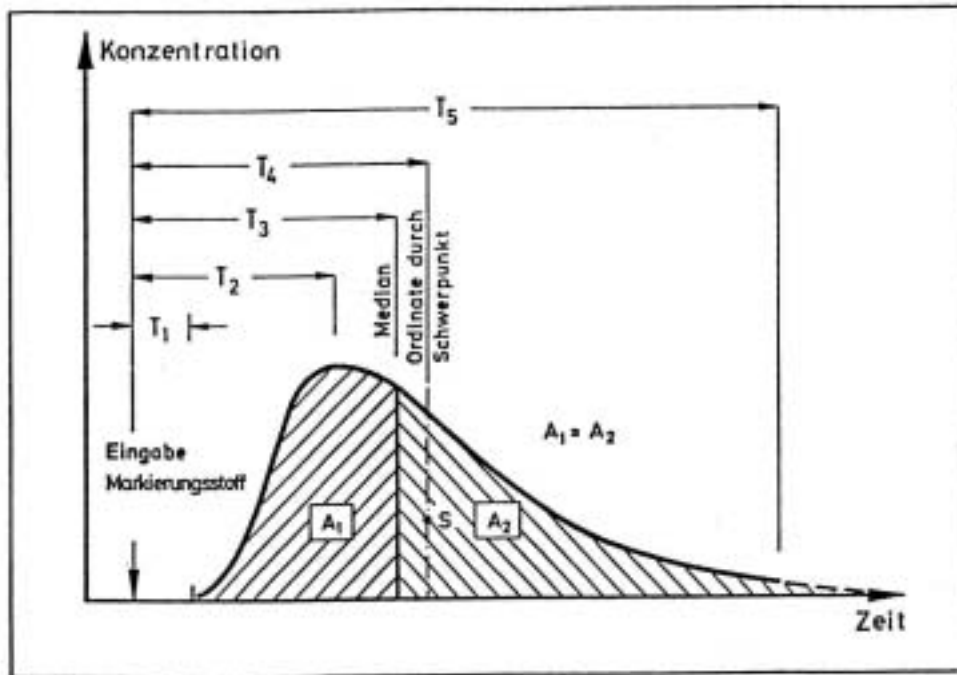
Mit  $Q$  = Durchfluss in m³/s

$Q_1$  = Zufluss der Eingabelösung in m³/s

$C_1$  = Konzentration der Eingabelösung in mg/m³

$C_2$  = Konzentration an der Entnahmestelle in mg/m³

Durchflussberechnung bei momentaner Injektion (Integrationsmethode):



$$Q = \frac{M}{\int_0^t C_2 \cdot dt}$$

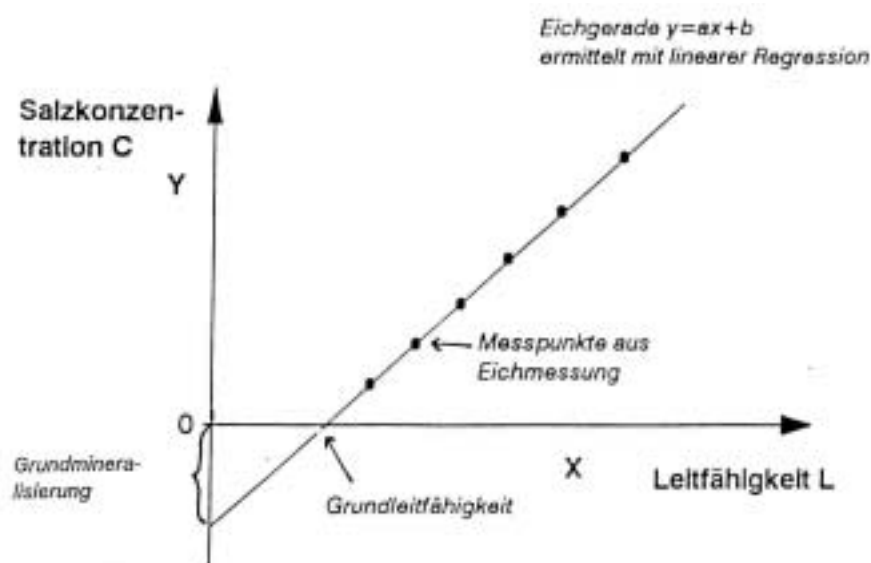
Mit  $Q$  = Durchfluss in m³/s

$M$  = Eingabemenge in mg

$C_2$  = Konzentration an der Entnahmestelle in mg/Zeit

$T$  = Zeit in Sekunden

SALZ- und LÖSUNGSWASSERBEDARF in FUNKTION der geschätzten WASSERFÜHRUNG		
geschätzter Abfluß [l/s]	Salzbedarf [kg]	Lösungswasser [l]
50	0,25	1
100	0,50	1,5
150	0,75	2,5
200	1,00	3
300	1,25	4
400	1,75	5
500	2,00	6
600	2,25	7
700	2,75	8
800	3,00	9
900	3,25	10



$$C(t) = (L(t) - L_0) \cdot a$$

$$Q = \frac{M}{a \int_0^t (L(t) - L_0) dt}$$

Q = Abfluß

M = Eingegebene Salzmenge

a = Steigung der Eichgeraden (Eichkoeffizient)

### Durchflussermittlung nach der Salzverdünnungsmethode:

$$Q = \frac{m[NaCl]}{\alpha \cdot \int_{t_1}^m LF(t) \cdot dt}$$

Mit Q.....Durchfluss in m<sup>3</sup>/s

m .....Masse [NaCl] in kg

$\alpha$  ..... Eichkoeffizient  $\frac{c[NaCl]}{LF}$  in  $\frac{\frac{g[NaCl]}{m^3}}{\frac{\mu S}{cm}}$

LF(t) ..... Leitfähigkeit zur Zeit t

t<sub>1</sub> ..... Zeitpunkt des ersten Tracernachweises

t<sub>n</sub> ..... Zeitpunkt des letzten Tracernachweises

Neben Aufnahme und numerischer Integration der Durchgangskurve bietet sich auch die Möglichkeit der "mechanischen Integration" bzw. der Pumpenmethode.

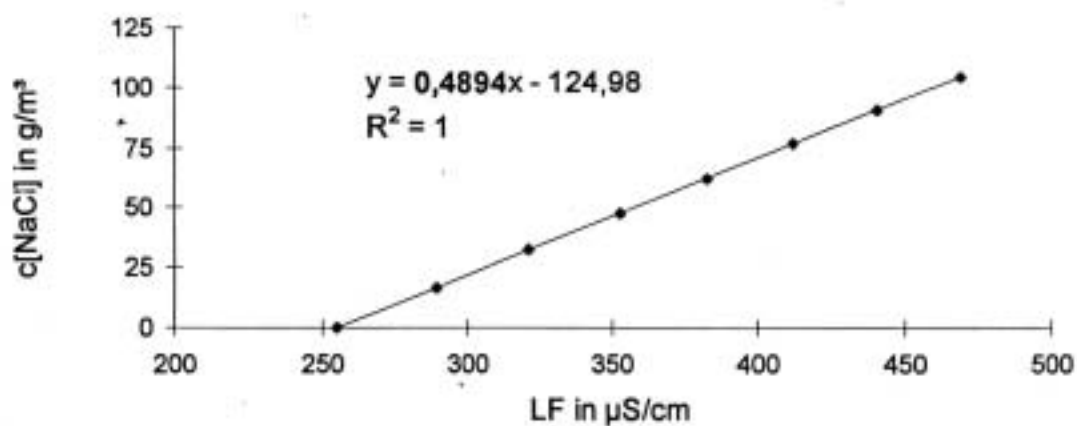
$$Q = \frac{m[NaCl]}{\alpha \cdot \Delta t \cdot (LF_q - LF_a)}$$

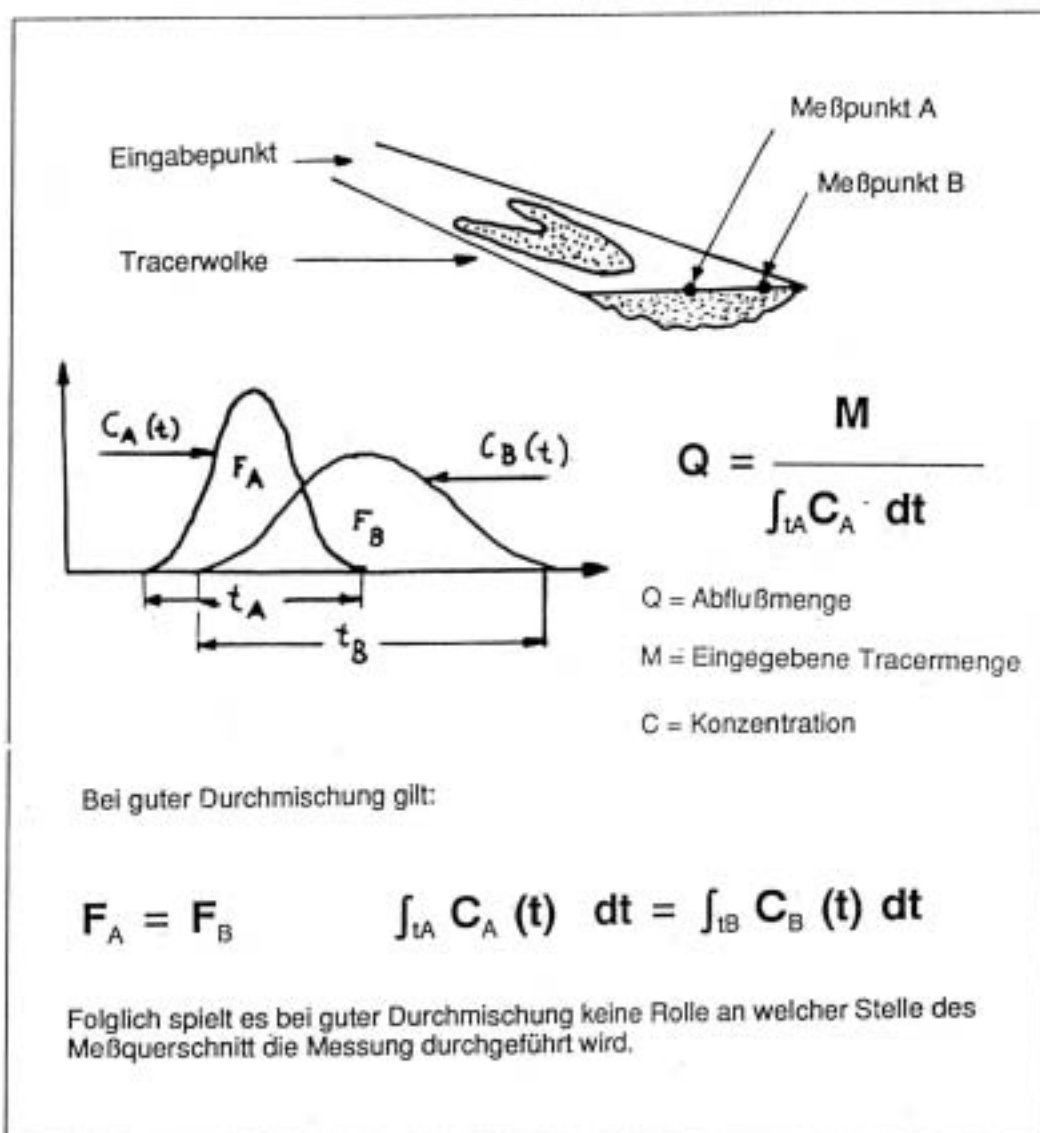
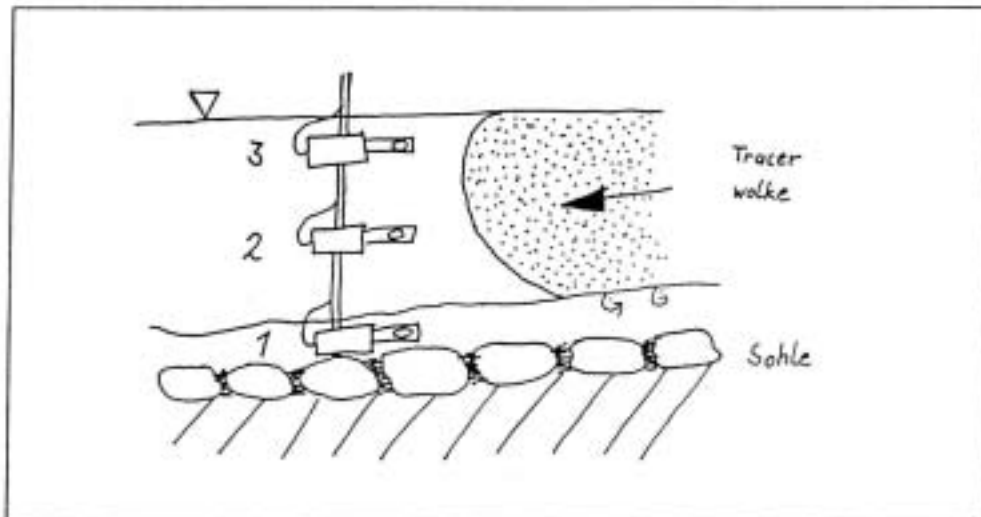
Mit  $\Delta t$  ..... Zeit des Tracerdurchgangs in s

LF<sub>q</sub> ..... Leitfähigkeit der Mischprobe in  $\mu S/cm$

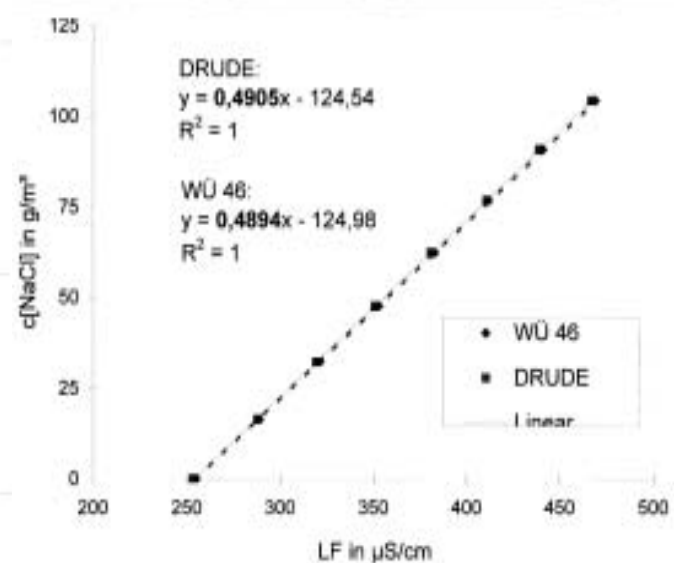
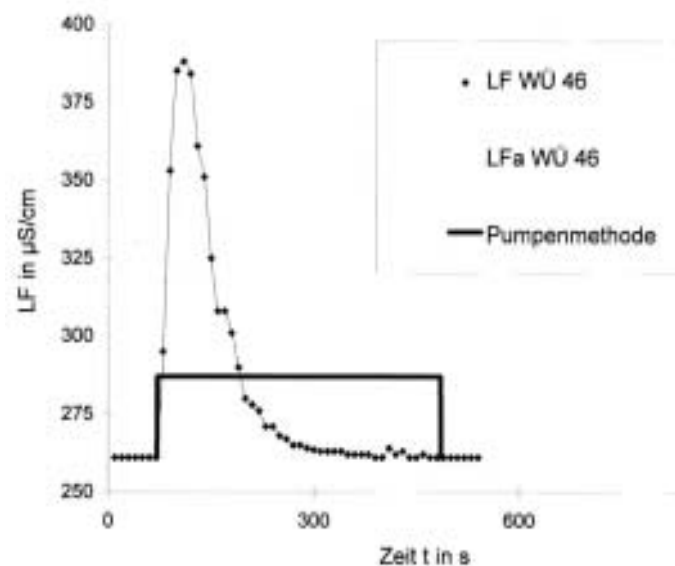
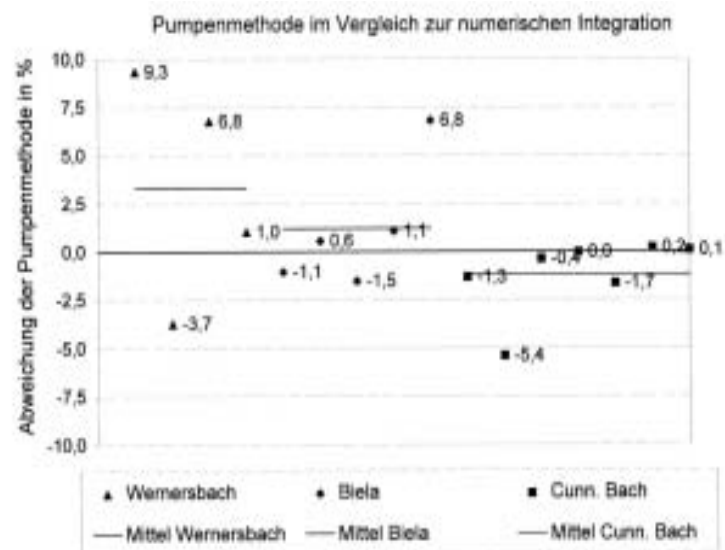
LF<sub>a</sub> ..... Hintergrundleitfähigkeit des Gewässers in  $\mu S/cm$

- Ermittlung des Eichkoeffizienten  $\alpha$ :





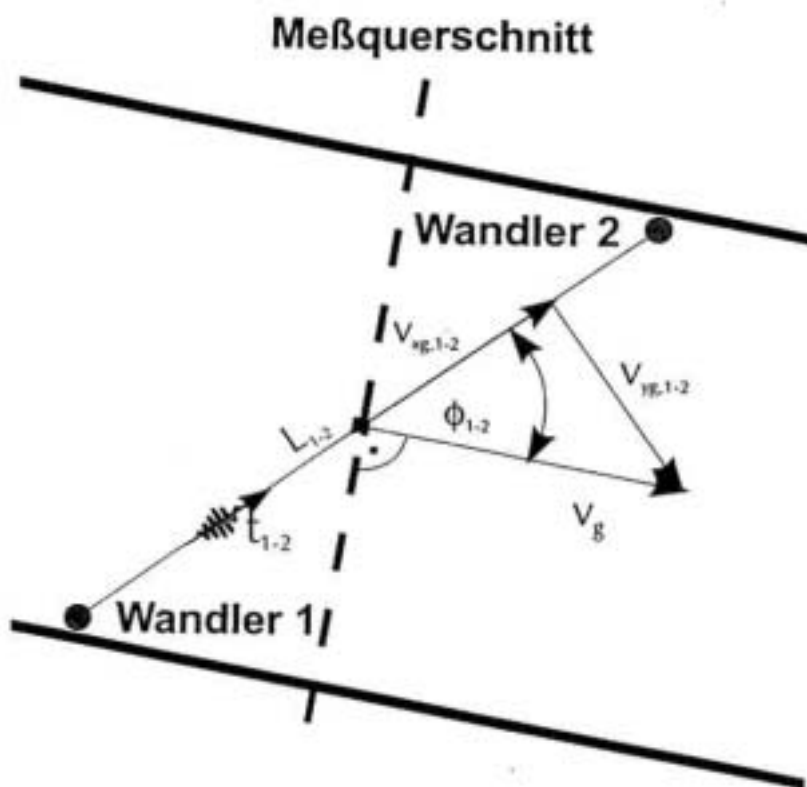




### Akustische Verfahren: (Quellen: Pegelvorschrift)

Akustische Verfahren bieten den Vorteil einer kontinuierlichen Messung. Man erfasst die mittlere Fließgeschwindigkeit in der Messebene, die i.d.R. durch Multiplikation mit einem Korrekturfaktor zum Durchfluss am Fließquerschnitt führt. Der Korrekturfaktor kann durch Vergleichsmessungen mit dem Vielpunktverfahren ermittelt werden.

Messprinzip der Ultraschallabflussmessung:



$$Q = \bar{V}_g \cdot k \cdot A$$

$$\bar{V}_g = \frac{L_{1-2}}{2 \cdot \cos \Phi_{1-2}} \cdot \left( \frac{1}{t_{1-2}} - \frac{1}{t_{2-1}} \right)$$

$t_{1-2,2-1}$  = Laufzeit des akustischen Signals zwischen Wandler 1 (2) und Wandler 2 (1)

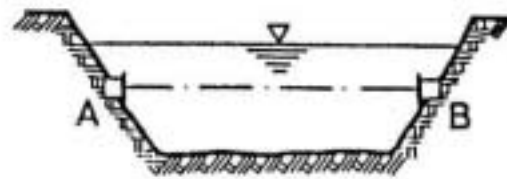
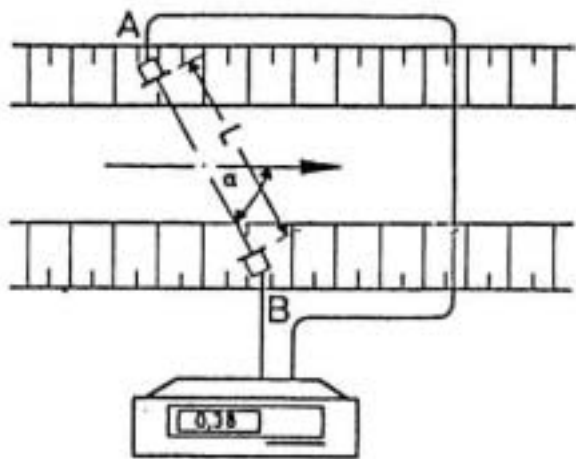
$L_{1-2}$  = Entfernung zwischen Wandler 1 und Wandler 2

$\bar{V}_g$  = Fließgeschwindigkeit in Strömungsrichtung

$Q$  = Durchfluss

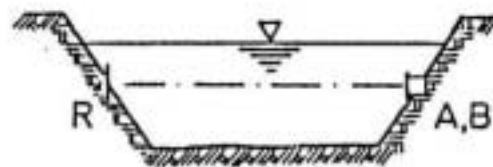
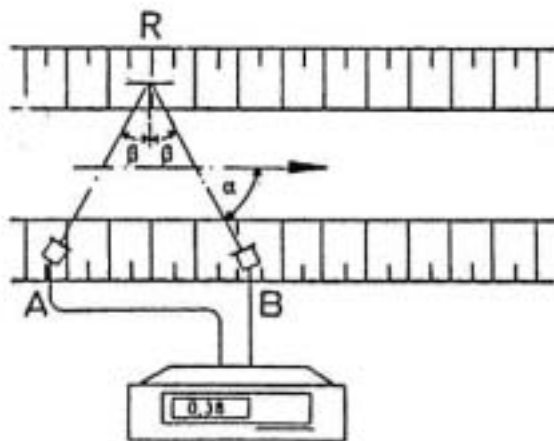
$k$  = Kalibrier- Faktor

$A$  = Fläche des Messquerschnitts



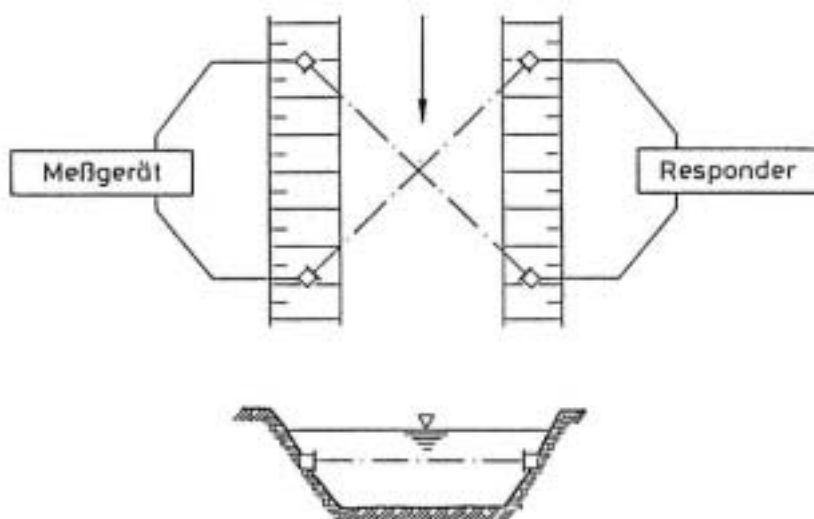
A, B Wandler  
A-B Meßstrecke

Prinzip der Ultraschall- Strömungsmessung

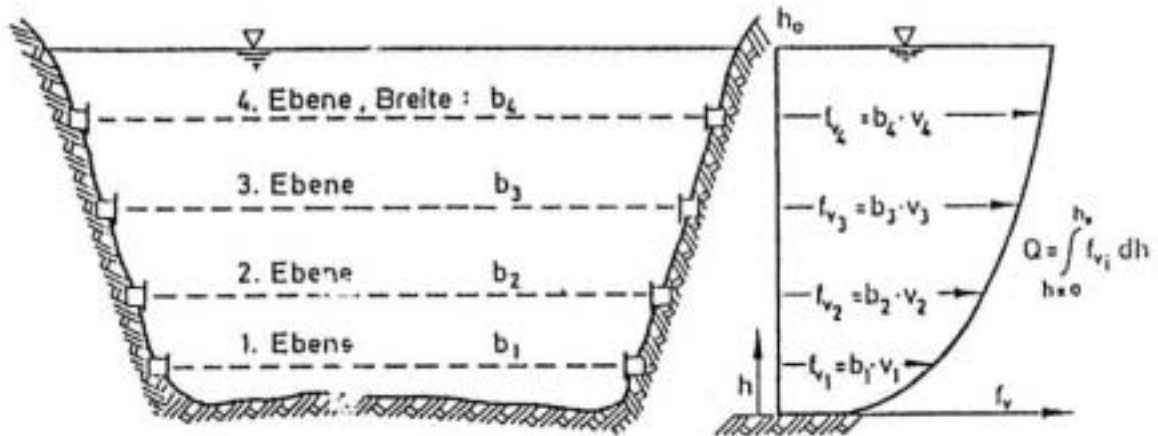


A, B Wandler  
R Reflektor  
A-R-B Meßstrecke

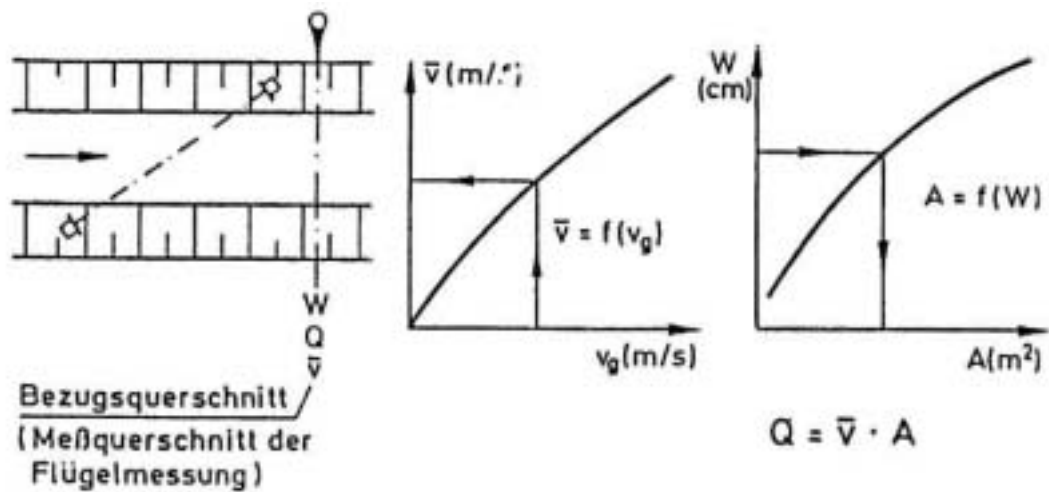
Prinzip der Ultraschall- Strömungsmessung mit Reflektor



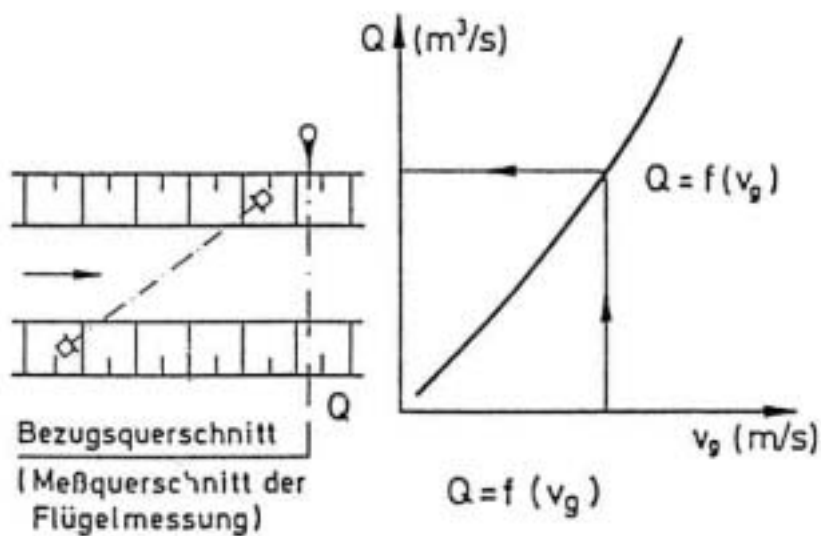
Prinzip der Ultraschall- Kreuzstrecken- Anlage



Durchflussermittlung mit einer Ultraschall- Mehrebenen- Anlage



Durchflussermittlung nach der Beziehung  $Q = f(v_g, W)$

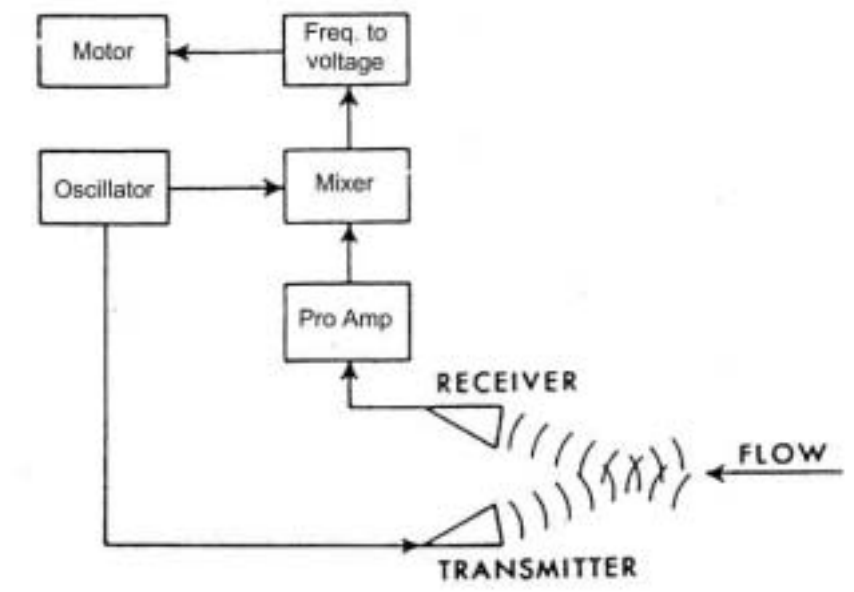


### Ultraschall- Doppler Verfahren: (Quellen: RD Instruments; M. Adler)

Das ADCP Verfahren (Acoustic Doppler Current Profiler) beruht auf der Messung einer Frequenzverschiebung zwischen einem Ausgangs- und einem Eingangssignal, die durch den Doppler- Effekt hervorgerufen wird.

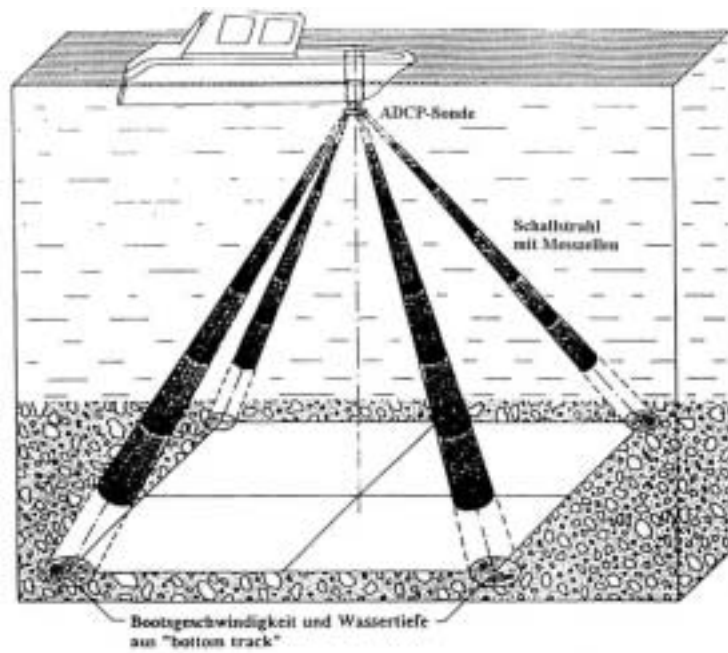
Diesen Effekt macht man sich bei der Bestimmung von Durchflüssen in Gewässern zu nutze. Dabei wird ein akustisches Signal einer vorgegebenen Frequenz in das Gewässer ausgestrahlt. Dieses Signal wird von Schwebstoffteilchen im Gewässer gestreut und reflektiert. In Abhängigkeit von der Fliessgeschwindigkeit der Schwebeteilchen verschiebt sich die Frequenz des reflektierten Signals.

$$f_R = \frac{c + V \cdot \cos T}{c - V \cdot \cos R} \cdot f_T$$
$$V = \frac{c \cdot (f_R - f_T)}{f_T \cdot \cos T + f_R \cdot \cos R}$$



Beim ADCP Verfahren besteht das Gerät aus:

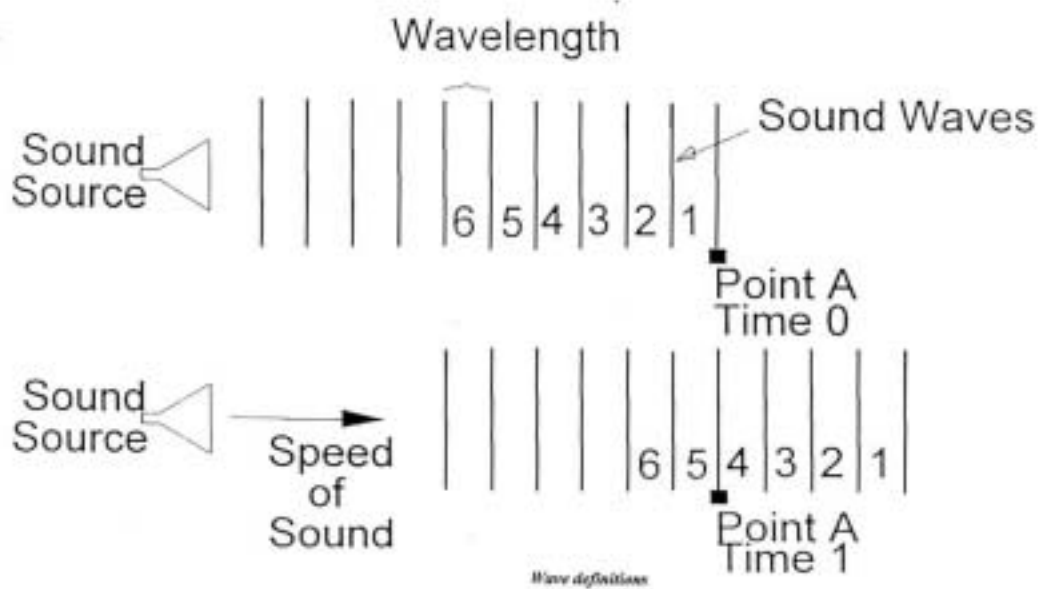
- 4 Ultraschall- Wandlern
- 1 Pendel
- 1 Magnetkompass
- 1 Thermometer

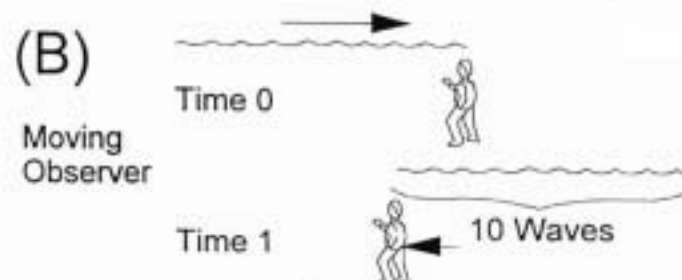
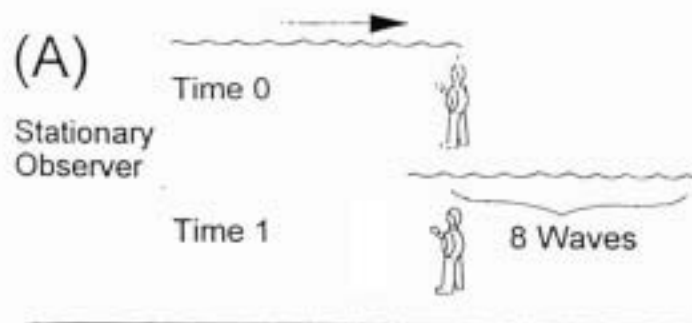


Speed of sound = frequency  $\times$  wavelength

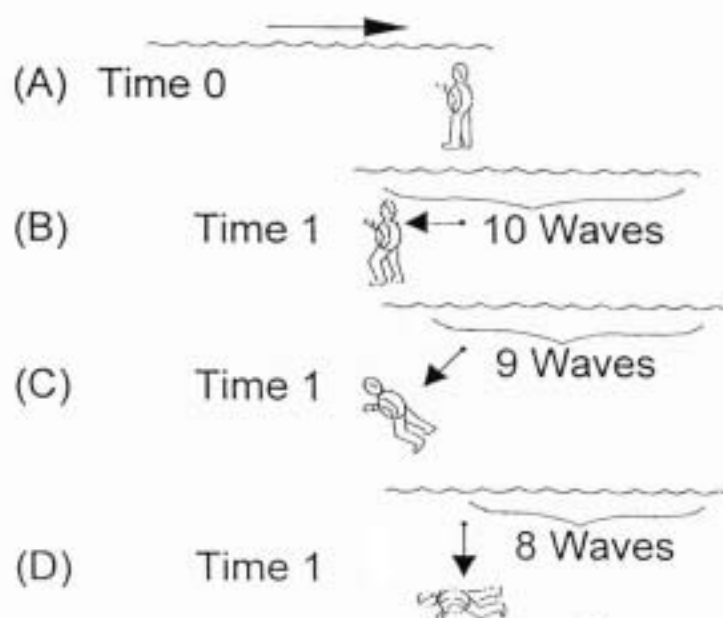
$$C = f \lambda$$

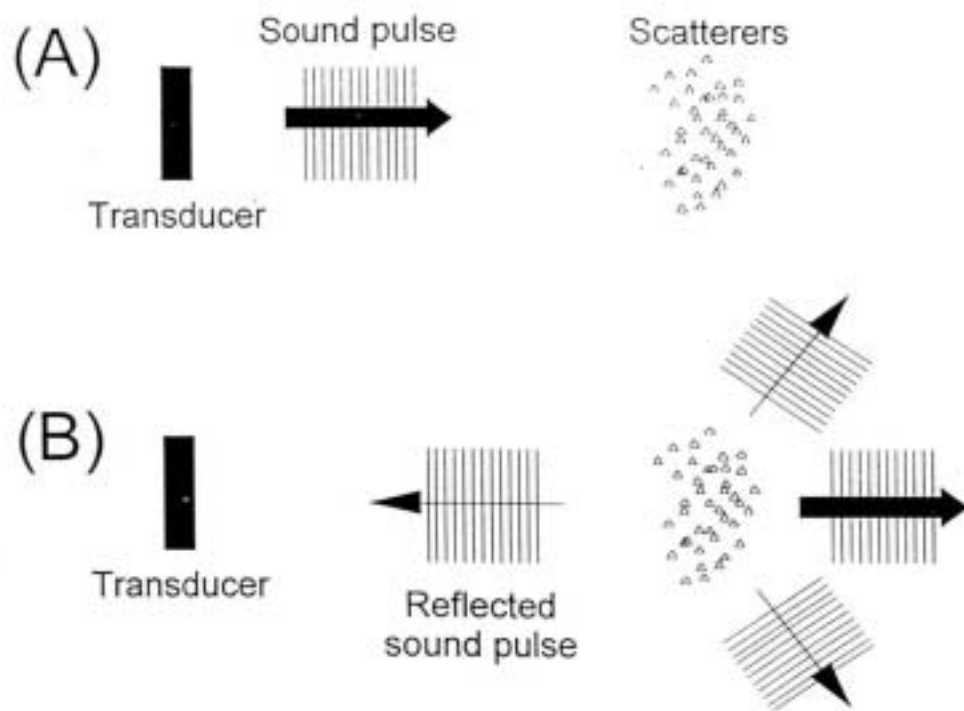
(example,  $1500 \text{ m/s} = 300,000 \text{ Hz} \times 5 \text{ mm}$ )





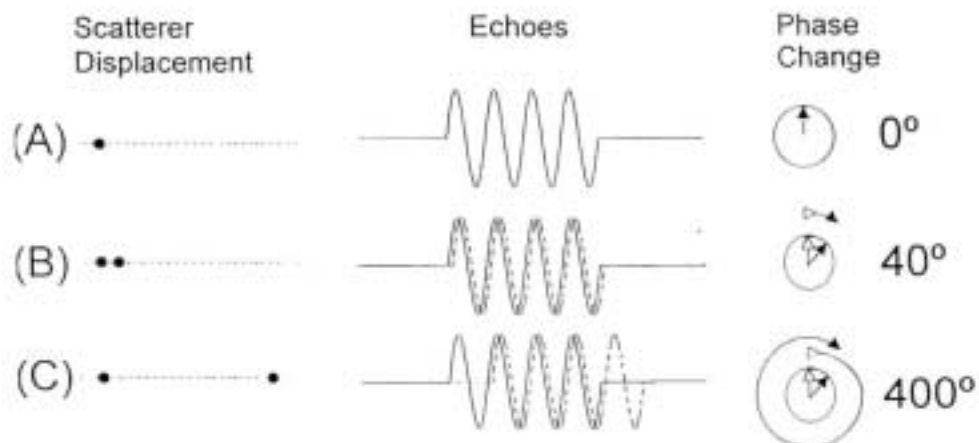
*The Doppler effect. An observer walking into the waves will see more waves in a given time than will someone standing still.*



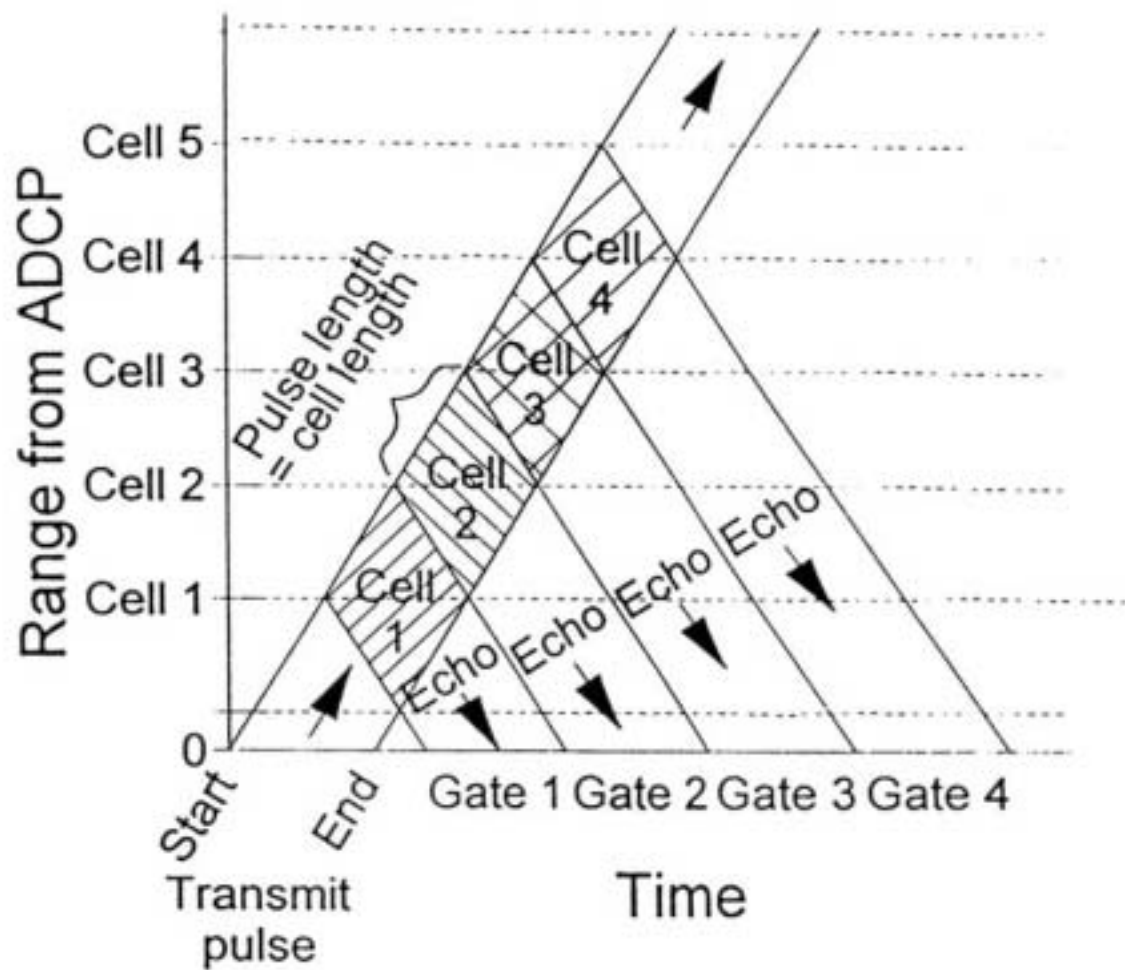


*Backscattered sound. (A) Transmitted pulse; (B) A small amount of the sound energy is reflected back (and Doppler shifted), most of the energy goes forward.*

### Time Dilation

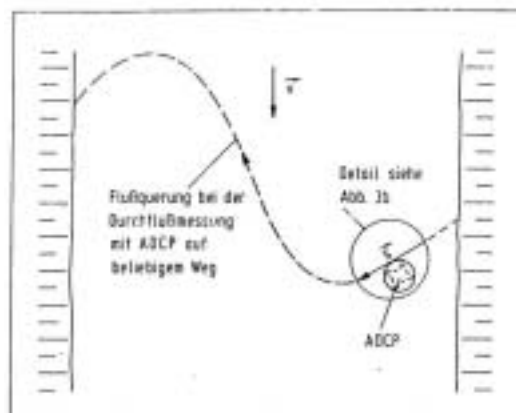
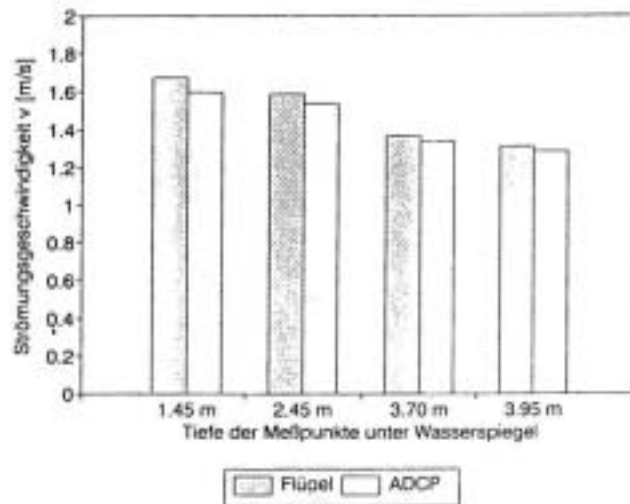




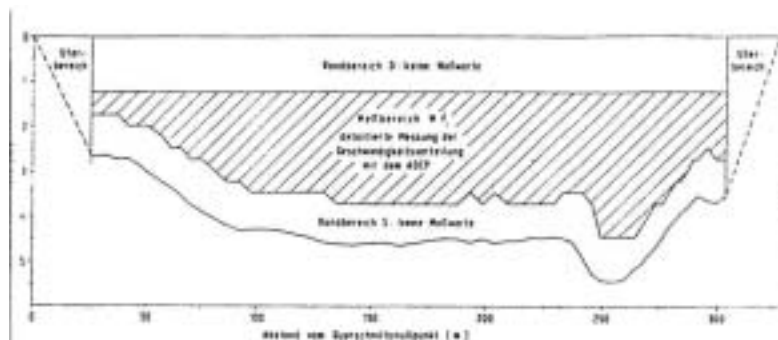


*Range-time plots show how transmit pulses and echoes travel through space. Time starts at the beginning of the transmit pulse and range starts at the transducer face.*

Meßstelle	Durchflußermittlung mit		Abweichung
	Flügeln	ADCP	
Kaub Rhein-km 549,230	$Q = 1271 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = 1263 \text{ m}^3/\text{s}$	- 0,6 %
Brohl Rhein-km 620,346	$Q = 1637 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = 1602 \text{ m}^3/\text{s}$	- 2,1 %



Nr.	Meßplatz schematisch	Abfluß [m³/s]	Abweichung vom Mittelwert [%]
1		1556	0
2		1611	-1
3		1607	0
4		1580	-1
5		1617	-1



Mittelwert : 1602  
Standardabweichung : 13

## Sensor Nautilus C 2000 (Quelle: Ott)

Funktion:

Das magnetisch- induktive Prinzip nach Faraday ist dazu prädestiniert, kleinste Fliessgeschwindigkeiten zu messen.

Bewegt sich ein elektrisch leitendes Medium in einem Magnetfeld, so wird in diesem Leiter eine Spannung induziert.

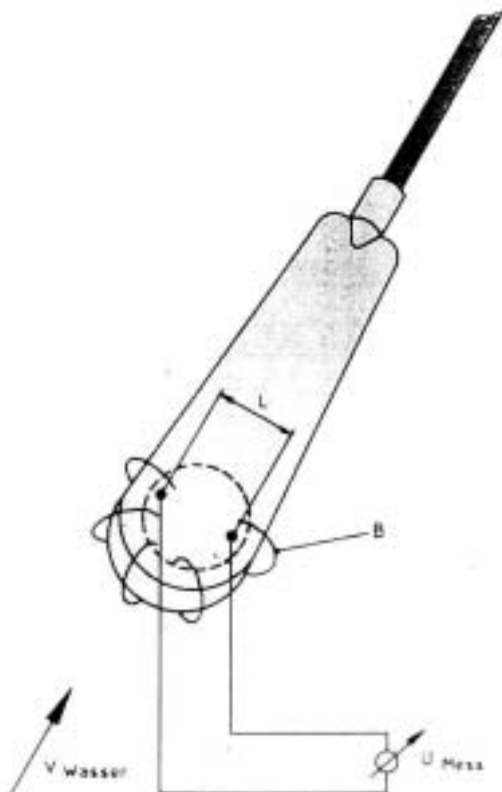
$$U = B \cdot L \cdot v$$

U = Messspannung

L = Länge des Leiters

B = Magnetfeld

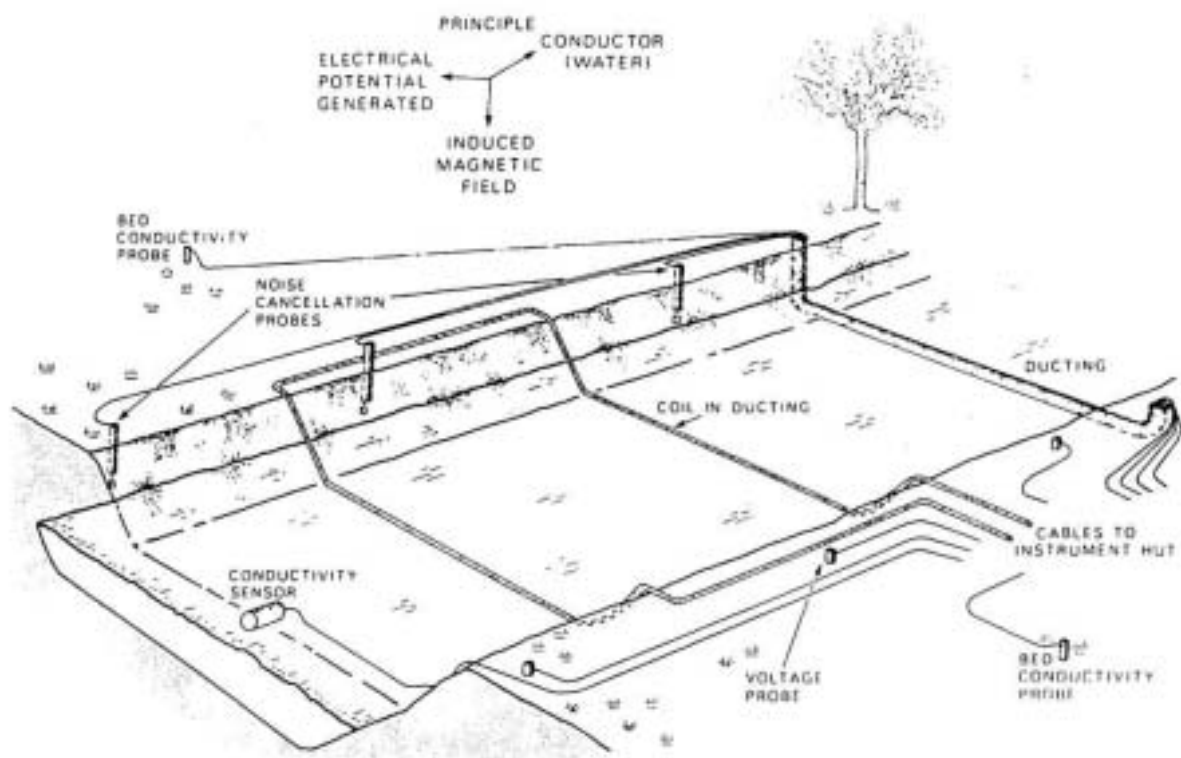
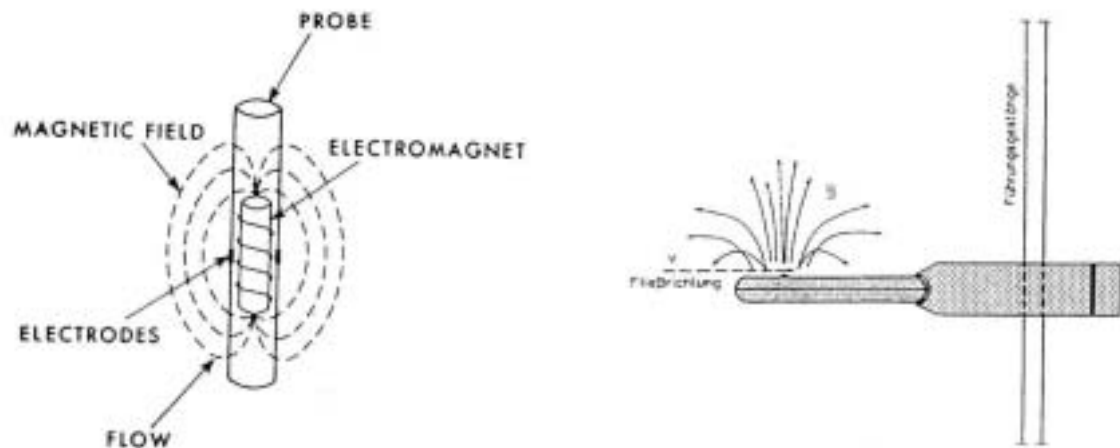
V = Geschwindigkeit



Mindestleitfähigkeit des Mediums: 5µS

## Magnetisch- Induktive Verfahren:

Die magnetisch- induktiven Verfahren zur Durchflussmessung beruhen auf dem Faraday'schen Induktionsgesetz.

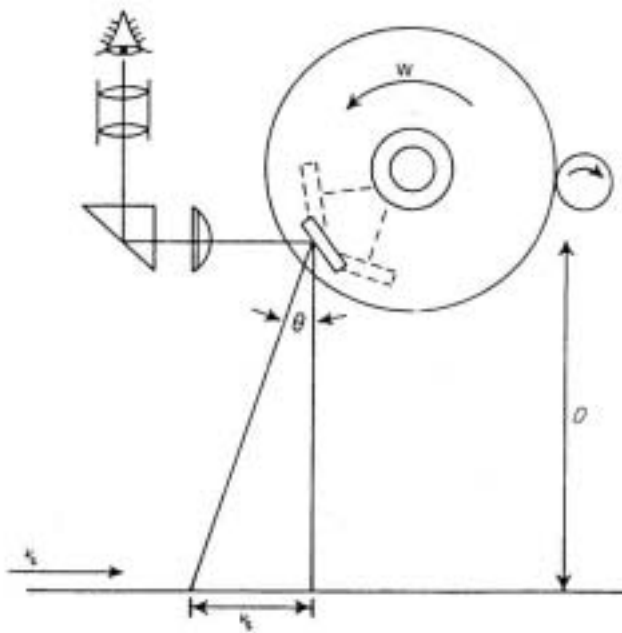


Quelle: Herschy

### Optische Verfahren:

Es sind zwei optische Verfahren zur Durchflussbestimmung zu unterscheiden:

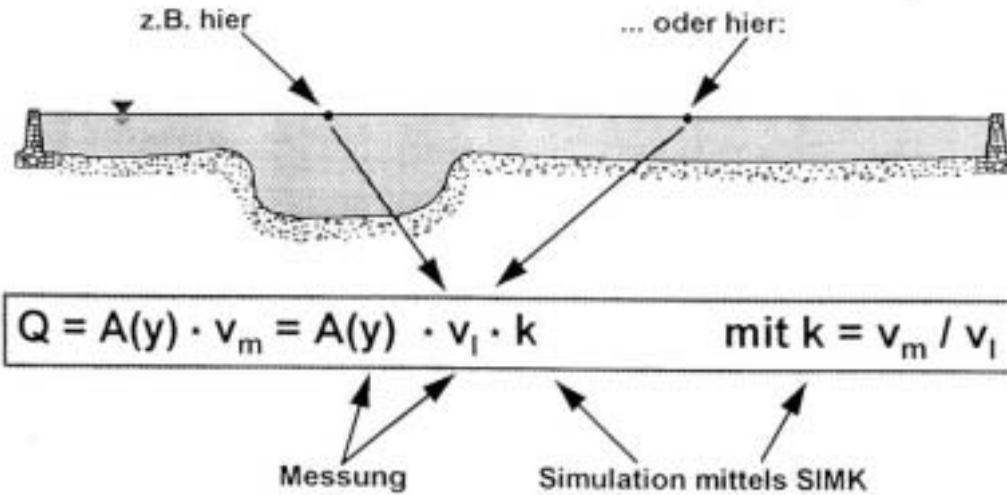
- Das Stroboskopverfahren eignet sich nur zur Bestimmung von Oberflächengeschwindigkeiten und wird bei schnellfließenden Gewässern eingesetzt (nicht bei turbulentem Fluss).



- Das VISAB Verfahren ermöglicht die Messung des Durchflusses in einem 3-dimensionalen Ausschnitt des Profils. Es ist nicht für stark schwebstoffhaltige Gewässer geeignet.

- Die SIMK - Alternative :

- » Messung von Wasserstand  $y$  und einer (oder weniger) lokaler Geschwindigkeiten  $v_l$



- » und Bestimmen des Verhältnisses von lokaler ( $v_l$ ) und mittlerer ( $v_m$ ) Geschwindigkeit mit Hilfe eines numerischen Strömungsmodells

- Finite - Element - Diskretisierung

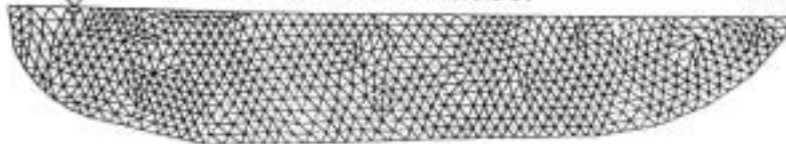
- » bei Hochwasser:



Vorteile:

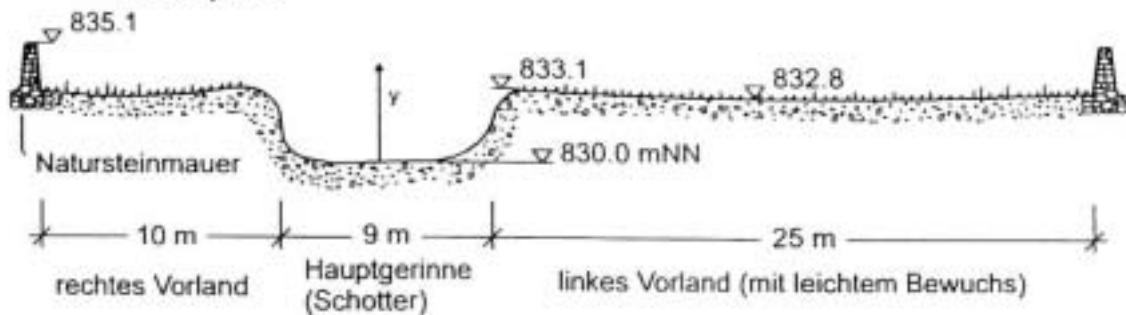
- ☐ sehr flexibel,
- ☐ universell anwendbar,
- ☐ Genauigkeit von der Profillform unabhängig

- » ... und bei Mittelwasser

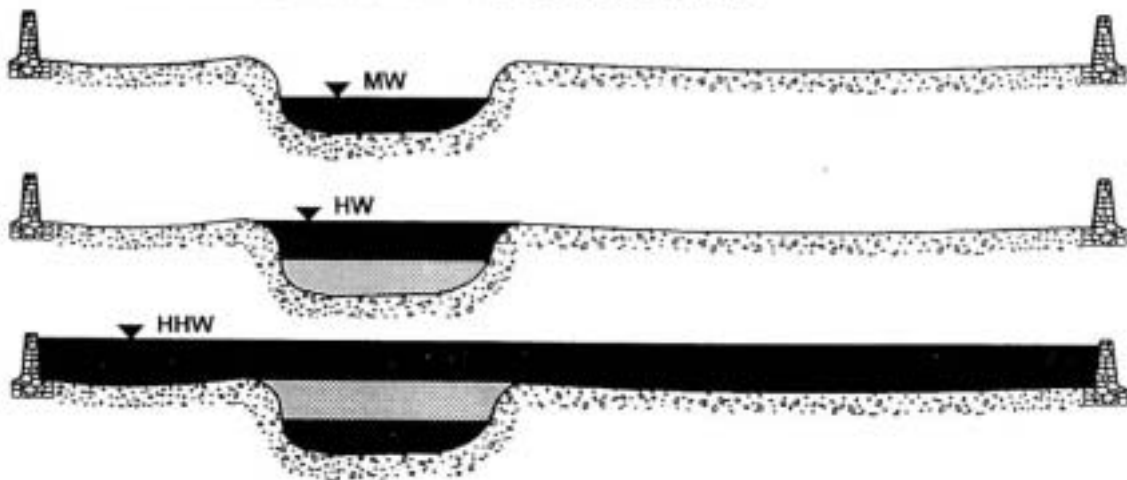


- Die Aufgabe:

- » Abflußmessungen in einem Bach oder Fluß
- Beispiel:



- » bei verschiedenen Wasserständen:

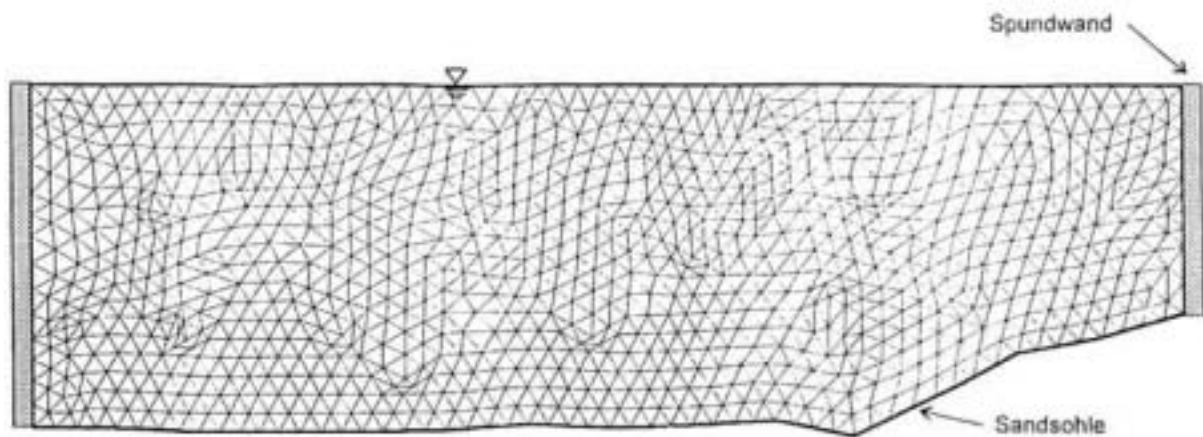


- konventionelle Kalibrierung der Meßstelle:

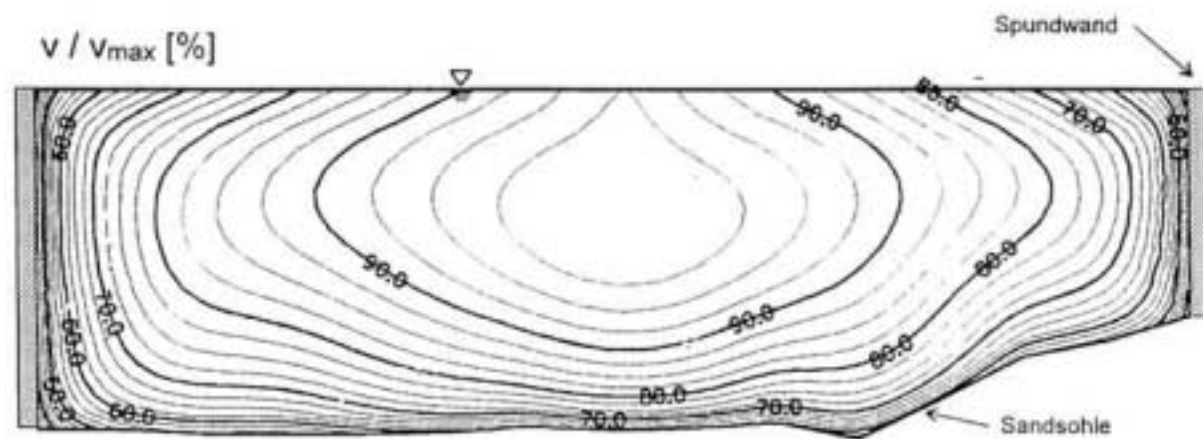
- » Aufnahme von Geschwindigkeitsprofilen i.d. R. mit hydrometrischem Meßflügel



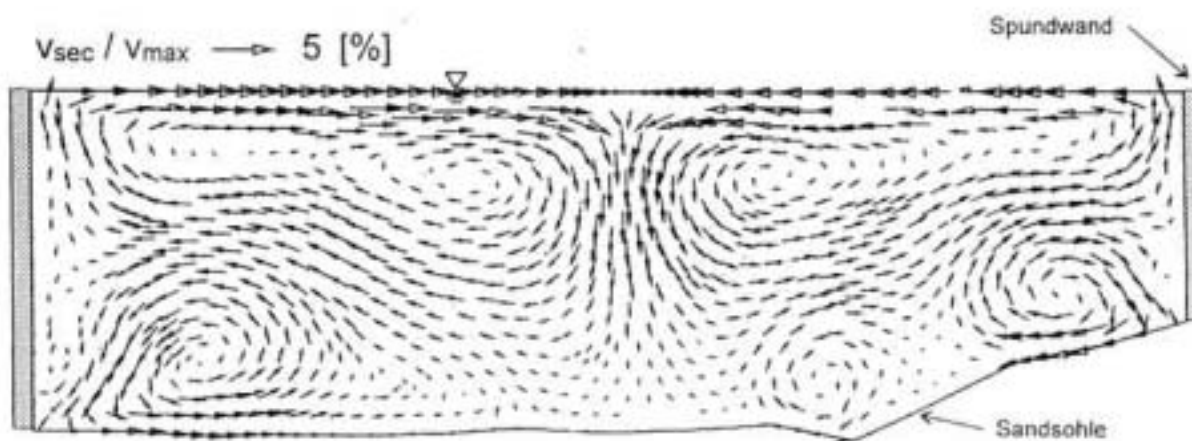
und bei (extremem) Hochwasser ?



Finite - Element - Netz des Profils Mühlendamm an der Spree - Oder - Wasserstraße in Berlin



Simulierte turbulente Geschwindigkeitsverteilung für das Profil Mühlendamm

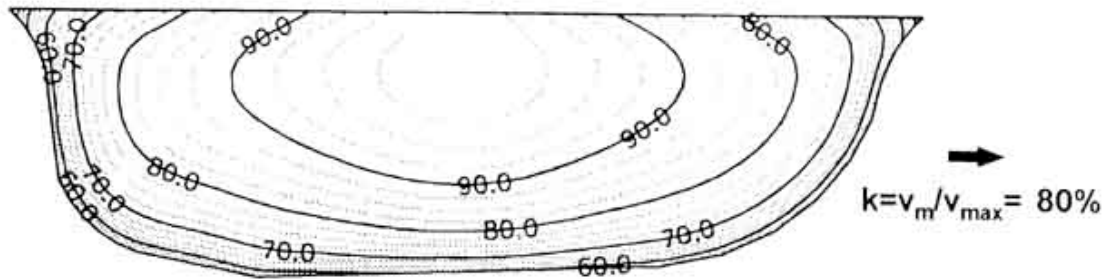


Simulierte Verteilung der Sekundärströmungen für das Profil Mühlendamm



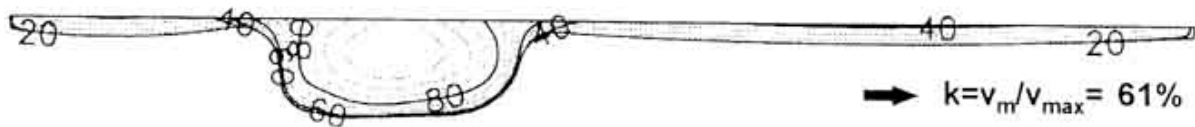
- Die Auswertung der simulierten turbulenten Geschwindigkeitsverteilungen ...

$y = 832.80 \text{ mNN}$ :



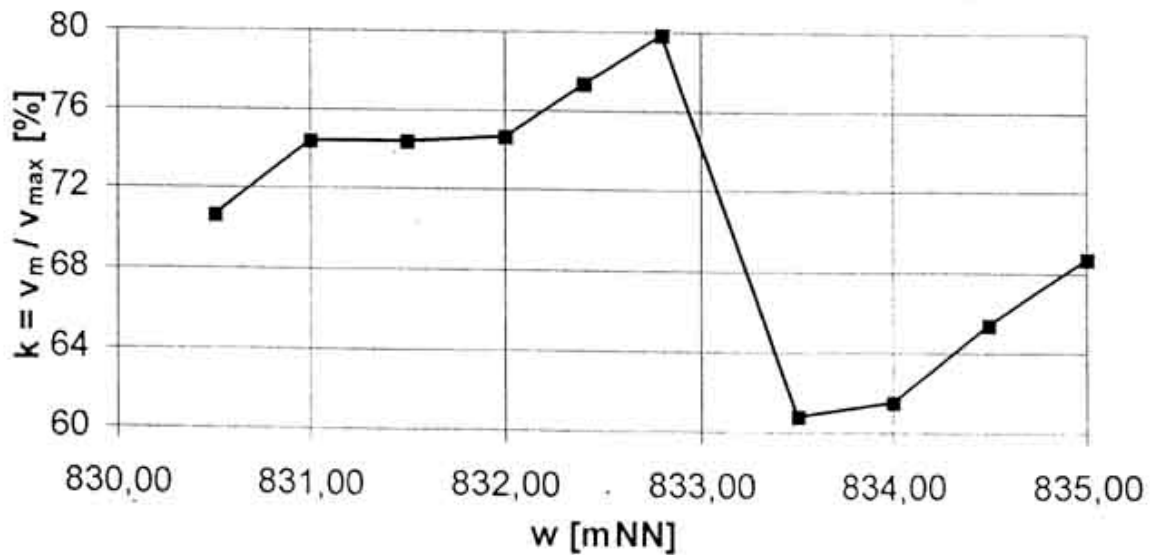
- ... liefert für beliebige Wasserstände ...

$y = 833.50 \text{ mNN}$ :



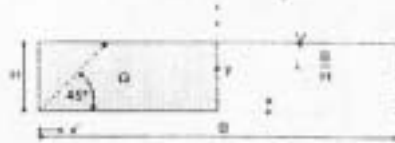
- ... die gesuchten Skalierungsfaktoren  $k$ :

➔ **Schlüsselkurve  $w - k$  ( $Q = A \cdot v_{\max} \cdot k$ )**



● SIMK - Verifikationen:

» 1. Rechteckkanal



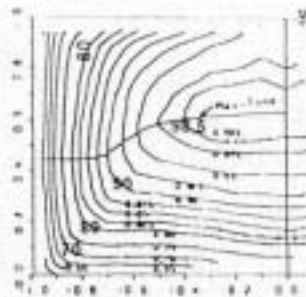
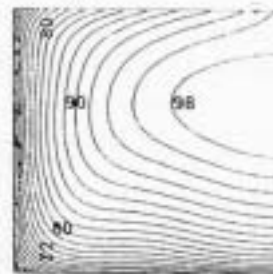
Hauptströmung:

$v / v_{max}$  [%]

$B / H = 2$

Rechnung

Messung



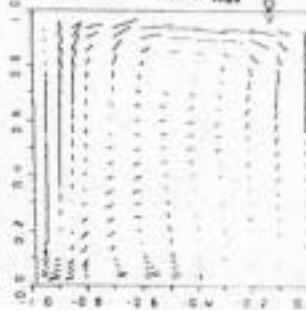
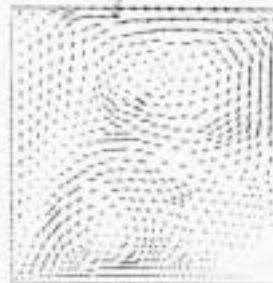
Sekundärströmung:

Rechnung

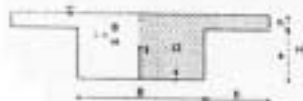
$-0.02 v_{max}$

Messung

$+0.02 v_{max}$



» 2. Vorlandprofil



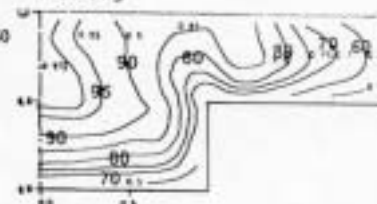
Hauptströmung:

$v / v_{max}$  [%]

$H / h = 2$

Rechnung

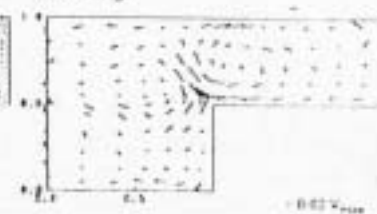
Messung



Sekundärströmung:

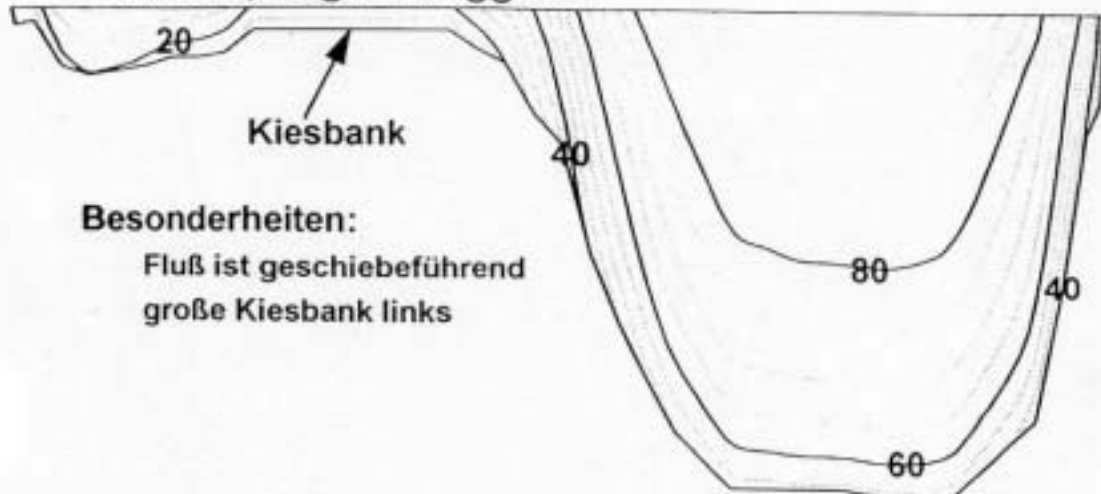
Rechnung

Messung



● SIMK - Praxisanwendungen:

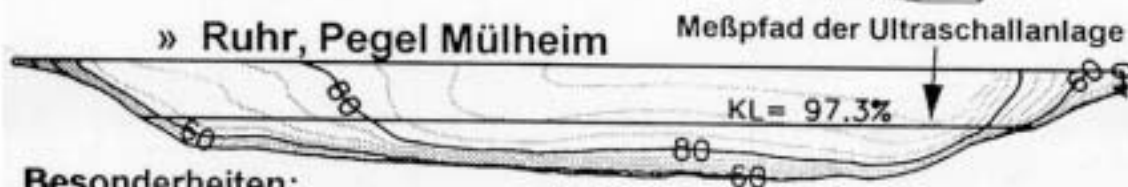
» Isar, Pegel Lenggries



**Besonderheiten:**

Fluß ist geschiebeführend  
große Kiesbank links

» Ruhr, Pegel Mülheim



**Besonderheiten:**

HQ=800 m<sup>3</sup>/s

SIMK-Anwendung auf eine Flußkrümmung (R=600m)

Geschwindigkeitsmessung mittels Ultraschall-Laufzeit

» Elbe (km 57.8), Pegel Dresden

