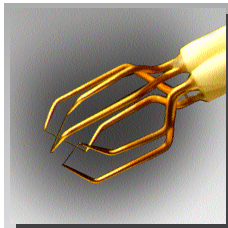


# Geschwindigkeitsmessung in einer turbulenten Strömung mittels Hitzdrahtanemometrie

Messtechnik Vorlesung

8. November 2012



## Motivation - Turbulenz

### Die Hitzdrahtanemometrie ermöglicht

- die Messung der lokalen **Geschwindigkeit** und
- der sehr feinskaligen **Fluktuationsgeschwindigkeiten**.

### Der Student soll in der Lage sein (Praktikum),

- ein **CTA-Setup** festzulegen
- Messungen zur Bestimmung grundlegender **turbulenter Eigenschaften** auszuführen,
- die notwendigen **Vorbereitungen** zu treffen
- die **Datenerfassung und -auswertung** durchzuführen.
- **Fehler** einzuschätzen.

## CTA-Grundlagen - Wärmeübergang

### Charakteristik eines Hitzdraht-Sensor-Elementes

- **Strom** fließt durch einen Draht  $\rightarrow$  **Wärme** ( $I^2 R_W$ ).
- erzeugt **Wärme = Wärmeabgabe** (konvektiv)
- **Geschwindigkeitsänderung**  $\rightarrow$  Änderung der Drahttemperatur
- **neues Gleichgewicht** mit der Umgebung

### Wärmeabgabe des Drahtes abhängig von:

- **Geschwindigkeitsvektor**,
- **Temperaturbeaufschlagung**,
- physikalischen **Eigenschaften** / geometrischer Form (Draht),
- Strömungs**medium**.

# Dynamische Charakteristik, Grenzfrequenz

## Reaktion des Hitzdrahtes

- instationäre Wärmebilanzgleichung
- thermische **Trägheit**, Fluktuationen gedämpft
- **Kompensationen** mit Hilfe der Elektronik notwendig
- **Konstant-Temperatur-Anemometer**
- Erhöhung der Grenzfrequenz auf das bis zu 1000-fache [1,2].

## Kalibrierung

- **Spannung - Geschwindigkeit**
- Potenzgesetzbeziehung
- Einflussgrößen: **Re**, **Nu** und **Pr** [3]

## Grundlegende Gleichung

Für einen dünnen erwärmten Draht, der einer Geschwindigkeit ausgesetzt wird

$$W = Q + \frac{dQ_i}{dt}$$

$W$	Energie, die durch Erwärmung entsteht
$W = I^2 R_w$	wobei $R_w = R_w(T_w)$
$Q$	an die Umgebung abgeführte Wärme
$Q_i = C_w T_w$	im Draht gespeicherte thermische Energie
$C_w$	Wärmekapazität des Drahtes
$T_w$	Drahttemperatur

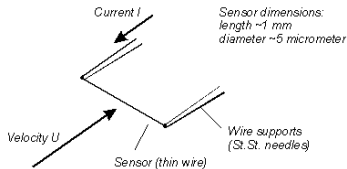


Abbildung: Sensor

## Statische Charakteristiken - stationärer Wärmeübergang

Die Wärmespeicherung im Draht ist Null:

$$W = Q = I^2 R_w = hA(T_w - T_0)$$

oder wenn  $h$  durch  $Nu$  ersetzt wird:

$$I^2 R_w = \frac{A}{d} Nu k_f (T_w - T_0)$$

- $h$  Film-Koeffizient des Wärmeübergangs
- $A$  Wärmeübertragungsfläche
- $d$  Drahtdurchmesser
- $k_f$  Wärmeleitfähigkeit des Fluids
- $Nu$  dimensionsloser Wärmeübergangskoeffizient

## Charakterisierung der Dynamik - Frequenzgrenze:

Den Wärmespeicher-Term hinzu addiert zur stationären Wärmeübertragungsgleichung ergibt

$$I^2 R_w = (R_w - R_0)(A + BU^n) + C_w \frac{dT_w}{dt}$$

oder  $T_w$  ausgedrückt durch  $R_w$  und den Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$

$$I^2 R_w = (R_w - R_0)(A + BU^n) + \frac{C_w}{\alpha_0 R_0} \frac{dR_w}{dt}$$

Diese Differentialgleichung hat die Zeitkonstante  $\tau$ :

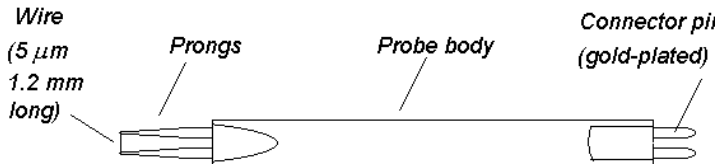
$$\tau = \frac{C_w}{\alpha_0 R_0 (A_1 + B_1 U^n - I^2)}$$

Das Frequenzlimit (3 dB Amplitudendämpfung)

$$f_{cp} = \frac{1}{2\pi\tau}$$

# Sondenkonstruktion

## *Miniature wire probes*



## *Gold-plated wire probes*

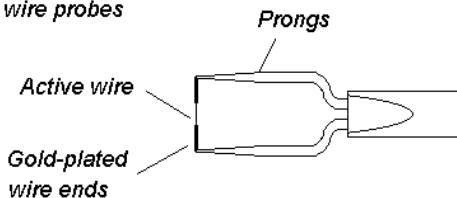


Abbildung: Sondenaufbau



## Die räumliche Auflösung

...des Hitzdrahtes in  
Strömungsrichtung  $l_x$  beträgt:

$$l_x = \frac{U_{mean}}{2f_{cp}}$$

Hohe räumliche Auflösung bei  
hoher Geschwindigkeit erfordert  
eine große Bandbreite.

Beispiel: Bei 50 m/s und Frequenzgrenze von 25 kHz: 1 mm in  
Strömungsrichtung.

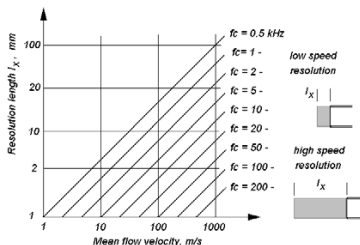
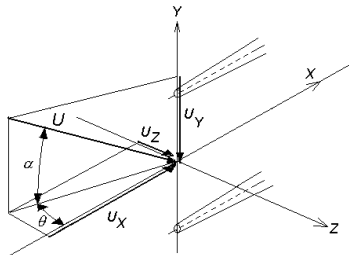
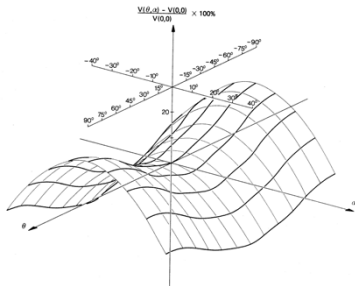


Abbildung: Räumliche Auflösung

## Richtungsempfindlichkeit (2/3-D Sonden) [4,5]

$$U_{eff}^2 = U_x^2 + k^2 U_y^2 + h^2 U_z^2$$



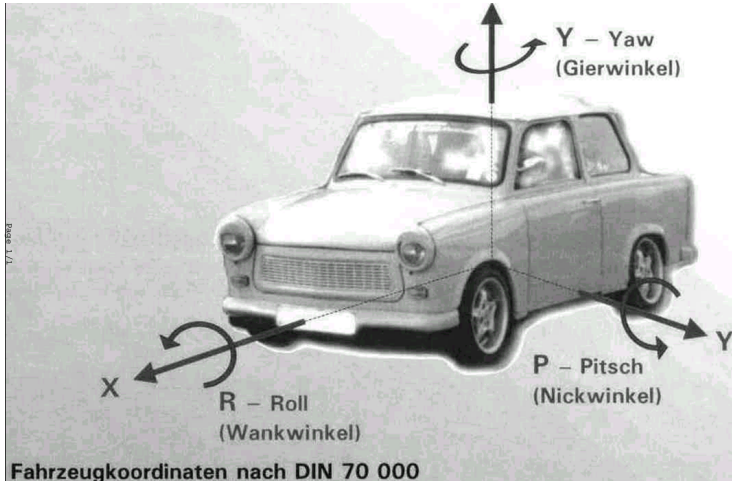
*Yaw angle =  $\alpha$*

*Pitch angle =  $\theta$*

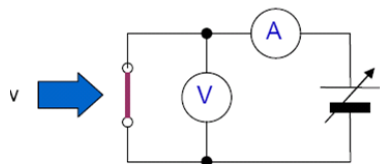
$$U(\alpha)^2 = U(0)^2(\cos^2 \alpha + k^2 \sin^2 \alpha), \text{ mit } \theta = 0$$

$$U(\theta)^2 = U(0)^2(\cos^2 \theta + h^2 \sin^2 \theta), \text{ mit } \alpha = 0$$

# Koordinaten im Vergleich zum Fahrzeug



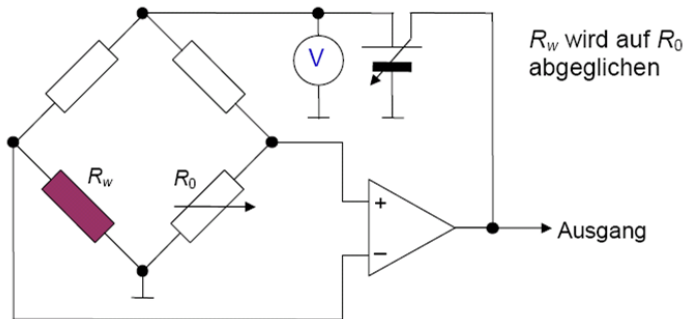
## Blockschaltbild eines CTA



$$I^2 \frac{R}{R - R_0} = A + Bu^n;$$

$$R = konst$$

$$u = f(I)$$



## Auswahl des Equipments

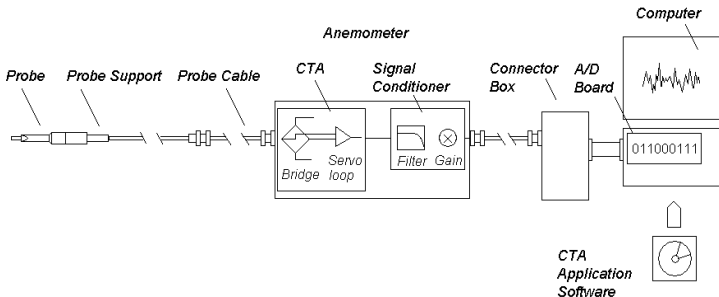


Abbildung: Typisches CTA-Equipment

## Auswahl des Equipments

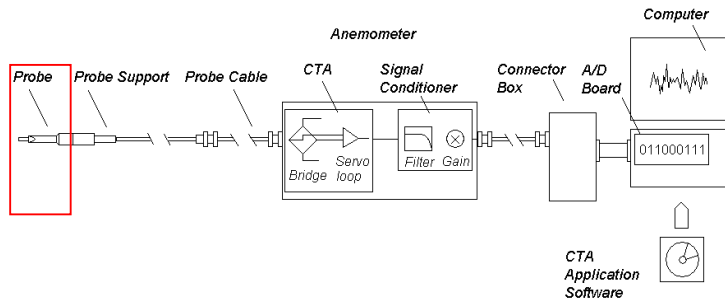


Abbildung: Typisches CTA-Equipment

## Sondenauswahl

### ...richtet sich nach:

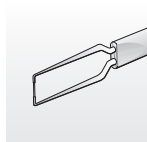
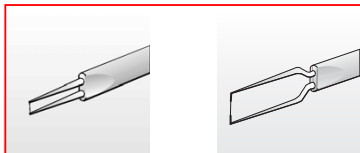
- dem Strömungsmedium
- der Anzahl der zu messenden Geschwindigkeitskomponenten
- dem erwarteten Geschwindigkeitsbereich
- der Größen, die gemessen werden sollen ( $U$ ,  $\tau$  usw.)
- der erforderlichen räumlichen Auflösung
- der Turbulenzintensität und Frequenz der Geschwindigkeitsschwankungen
- den Temperaturverhältnissen
- der Verschmutzungsgefahr
- den räumlichen Bedingungen um den Messpunkt herum (freie Strömung, Grenzschichtströmung, räumliche Beschränkungen)

# Schnelleinstieg in die Sondenauswahl

Free and Confined Flows		
Type of flow	Medium	Recommended Probes
<b>1-Dimensional</b>		
Uni-directional	Gas	Single sensor Wire Single sensor Fiber, thin coat. Wedge-shaped Film, thin coat. Conical Film, thin coat.
	Liquid	Single sensor Fiber, heavy coat. Wedge-shaped Film, heavy coat. Conical Film, heavy coat.
Bi-directional	Gas	Split-fibers, thin coat.
	Liquid	Split-fibers, heavy coat.
<b>2-Dimensional</b>		
One Quadrant	Gas	X-array Wires X-array Fibers, thin coat. V-wedge Film, thin coat.
	Liquids	X-array Fibers, heavy coat. V-wedge Film, heavy coat.
Half Plane	Gas	Split-fibers, thin coat.
	Liquids	Split-fibers, heavy coat.
Full Plane	Gas	Triple-split Fibers, thin coat. X-array Wire, flying hot-wire
	Liquids	Triple-split Fibers, <i>special</i>
<b>3-Dimensional</b>		
One Octant(70° Cone)	Gas	Tri-axial Wire Tri-axial Fiber, thin coat.
	Liquids	Tri-axial Fiber, <i>Special</i>
90° Cone	Gas	Slanted Wire, rotated probe
	Liquids	Slanted Fiber, heavy coat.
Full Space	Gas	Omnidirectional Film
<b>Wall Flows (Shear Stress)</b>		
Type of flow	Medium	Recommended Probes
<b>1-Dimensional</b>		
Unidirectional	Gas	Flush-mounting Film, thin coat. Glue-on Film, thin coat.
	Liquids	Flush-mounting Film, heavy coat. Glue-on Film, <i>special</i>



## Drahtsonden



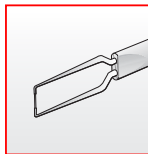
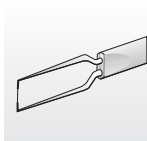
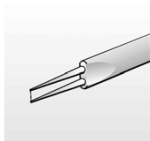
### Miniaturdrähte

- Für Anwendungen in Luft
- $T_u$  bis zu 5-10%
- höchster Frequenzgang
- können repariert werden
- am häufigsten angewendet

### mit Goldummantelung

- Für Anwendungen in Luft
- $T_u$  bis hin zu 20-25%
- Frequenzgang ist dem von Miniatursonden unterlegen
- können repariert werden

## Fiber-Filmsonden



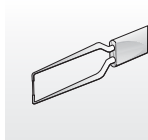
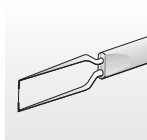
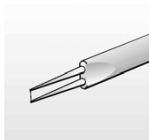
### mit dünnem Quartz-Überzug

- Für Anwendungen in Luft
- Frequenzgang ist dem von Drähten unterlegen
- robuster als Drahtsonden
- für weniger reine Luft
- können repariert werden

### mit stabilem Quartz-Überzug

- Für Anwendungen in Wasser
- Frequenzgang ist dem von Miniatursonden unterlegen
- können repariert werden

## Fibersonden



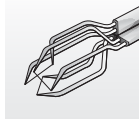
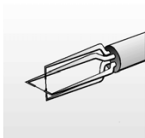
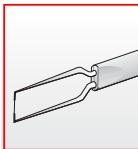
### mit dünnem Quartz-Überzug

- Für Anwendungen in Luft
- niedrige bis moderate Fluktuationsfrequenzen
- am robustesten CTA-Sondentypen
- für noch weniger reine Luft
- können nicht repariert werden

### mit stabilem Quartz-Überzug

- Für Anwendungen in Wasser
- robuster als Fibersonden
- können nicht repariert werden

## Eindrahtsonden



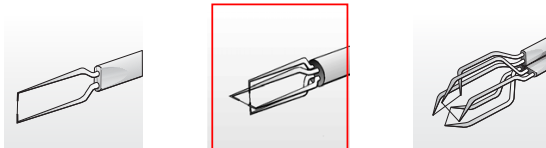
### normale Eindrahtsonden

Für eindimensionale beliebig gerichtete Strömungen. Verschieden angeordneten Haltestiften, die es erlauben, den Fühldraht genau senkrecht und die Stifte parallel zur Strömung auszurichten.

### schräg angeordnete Eindrahtsonden (45°)

Für dreidimensionale stationäre Strömungen, bei denen der Geschwindigkeitsvektor innerhalb eines Kegels von 90° auftritt. Während der Messungen muss die Sonde gedreht werden.

## Zweidrahtsonden



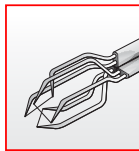
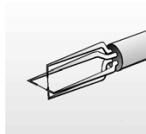
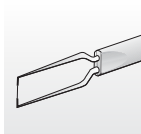
### X-Draht-Sonde

Für zweidimensionale Strömungen mit einem Geschwindigkeitsvektor innerhalb von  $\pm 45^\circ$  bezüglich der Sondenachse.

### Split-Fiber-Sonde

Für zweidimensionale Strömungen mit einem Geschwindigkeitsvektor innerhalb von  $\pm 90^\circ$  bezüglich der Sondenachse. Die kreuzweise räumliche Auflösung beträgt 0,2 mm und ist für Scherschichten besser geeignet als X-Draht-Sonden.

## Dreidrahtsonden



### Dreiachsige Sonde

Für zweidimensionale Strömungen, mit einem Geschwindigkeitsvektor innerhalb eines Kegels von  $70^\circ$  Öffnungswinkel um die Sondenachse. Die räumliche Auflösung ist durch eine Kugel mit einem Durchmesser von 1,3 mm definiert.

### Dreifach-Split-Filmsonde

Für vollständig umkehrbare zweidimensionale Strömungen mit einem akzeptierten Winkel von  $\pm 180^\circ$ .

## Auswahl des Equipments

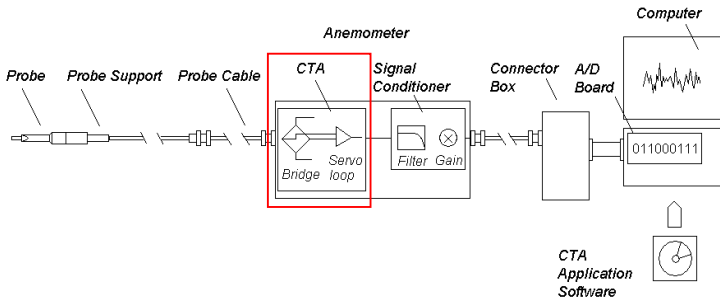


Abbildung: Typisches CTA-Equipment

## CTA-Anemometer

### CTA für Forschungszwecke (Streamline)

- typische Bandbreite: 100-250 kHz (max. 400 kHz).
- typisches Rauschen: 0,005% (bei 0,1%@10 kHz).
- typische Drift:  $0,5\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  (Verstärkereingang)

### CTA-Brücke

- 1:20-Brücke für allgemeine Zwecke bei Anwendung in Luftströmungen bei einer Bandbreite bis etwa 250 kHz.
- 1:20-Brücke für allgemeine Zwecke bei hoher Brückenleistung und Anwendung in Wasserströmungen.
- 1:1-symmetrische Brücke für Bandbreiten bis 400 kHz oder für lange Sondenkabel bis zu 100 m (reduziert auf 50 kHz).



## Auswahl des Equipments

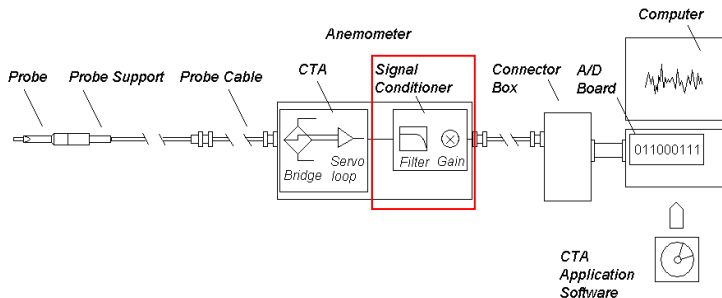


Abbildung: Typisches CTA-Equipment

## Signalaufbereitung - Auswahl

### Offset:

- sollte den Eingangsbereich des A/D-Wandlers überdecken,
- Praxis: den Bereich des CTA-Ausgangssignals (z.B. 0-5 V)

### Verstärkung:

- verbessert die Auflösung des A/D-Wandlers
- Verstärkung von 16: 12→16-bit-Wandler

### Hochpassfilter:

- beseitigt den Gleichanteil des Signals
- zum Entfernen geringer Frequenz-Fluktuationen

### Tiefpassfilter:

- beseitigt elektronisches Rauschen und beugt dem Aliasing vor
- sollte so steil wie möglich sein

## Auswahl des Equipments

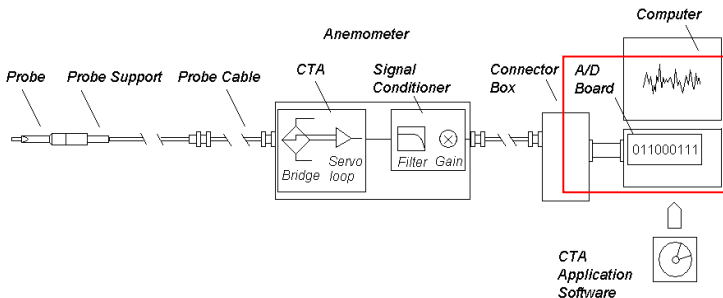


Abbildung: Typisches CTA-Equipment

## Auswahl des A/D-Wandlers

### Anzahl der Kanäle

- Anzahl der CTA-Kanäle
- plus zusätzliche Kanäle für Temperatur- und andere Messungen

### Input-Bereich

- mindestens den Spannungsbereich des CTA überdecken
- 0-10 V für die meisten Anemometer und Anwendungen

### Input-Auflösung

- erforderliche Auflösung der Daten...
- 12-bit-Wandler: Auflösung von 0,025%.

## Auswahl des A/D-Wandlers

### Sampling-Rate

- mehr als zweimal so hoch sein wie die maximale Frequenz in der Strömung
- wird durch die Anzahl der im Gebrauch befindlichen Kanäle  $n$  reduziert
- Ein 100 kHz Wandler deckt die meisten niedrigen bis mittleren Geschwindigkeiten ab ( $<100$  m/s).

### Simultanaufnahme

- zur Korrelation zwischen schnell aufgenommenen Kanälen (z.B. Reynolds'sche Schubspannung)

### Externe Triggerung

- für Messungen, die einem bestimmten Ereignis zugeordnet werden sollen

## Auswahl des Equipments

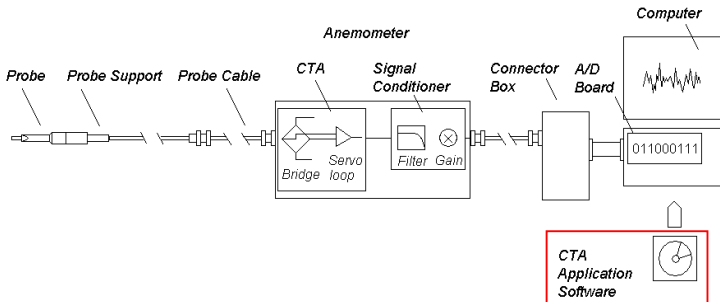


Abbildung: Typisches CTA-Equipment

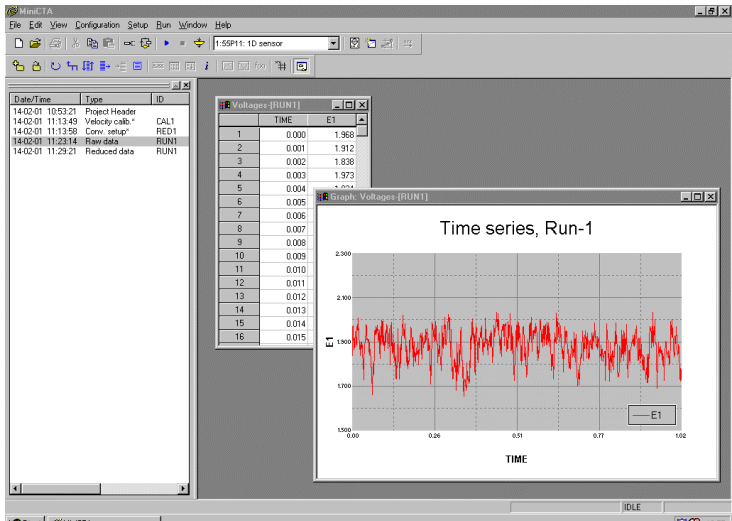


Abbildung: Screenshot mit Programmteilen (links) und einem  $E(t)$ -Verlauf

# Traversiervorrichtung

## Auswahl

### Achsen

Die Anzahl und die Längen hängen vom Experiment ab

### Schrittweite

Die lineare Auflösung sollte ausreichend sein. Kommerzielle Vorrichtungen haben eine Schrittweite kleiner 0,01 mm und eine Wiederholgenauigkeit von  $\pm 0,1$  mm

### Steuerung

Automatische Traversiervorrichtung von CTA-Anwendersoftware gesteuert



# Kalibrierung

## Kalibriervorrichtung

### zugehörige Kalibriervorrichtung

Geschwindigkeitsbereich	von wenigen cm/s bis zu einigen 100 m/s.
Genauigkeit	typischerweise $\pm 0,5\%$ vom Messwert, oberhalb 5 m/s.
Zusatzausstattung	Richtungskalibrierungen von Mehrdrahtsonden

### Windkanal mit Pitotrohr

Geschwindigkeitsbereich	von ca. 2 m/s bis zu typischerweise 50 m/s.
Genauigkeit	typischerweise $\pm 1,0\%$ vom Messwert, oberhalb 5 m/s (abhängig vom Druckmessgerät, starke Abnahme bei kleineren Geschwindigkeiten).

## Versuchsplanung

- **Was** soll **gemessen** werden? Welche physikalischen Variablen, welche statistischen Funktionen werden benötigt? Darstellung?
- Sensoren: Mess**empfindlichkeit**, potentielle **Probleme**
- Die zu **erwartenden Ergebnisse** vorher abschätzen, eventuell Testmessungen (auch mit anderen Geräten) durchführen.
- Den **Messaufbau** zusammenstellen.
- Bestimmung der optimalen **Datenrate**, der **Messzeit** und der **Anzahl der** erforderlichen **Messwerte**.
- Die **Funktion** des Messsystems bei variierenden Parametern **überprüfen**. Ist das System **unempfindlich** gegen kleine Änderungen im Messbereich, Verstärkung usw.?
- **Ergebnisse online anzeigen**, es kann Veränderungen geben z.B. der Temperatur, oder anderer Bedingungen während der Traversierung.

## Checkliste

- Festlegung der Größen, die zu messen sind
  - Momente höherer Ordnung, Frequenzverteilung, Wirbelgrößen
- Festlegung der Verteilung der Messpunkte
  - Einzelmessung, Profil (Traversierung), an mehreren Punkten
- Auswahl des Equipments und der Software
  - Strömungsmedium, Dimensionen, zu messende Größen, usw.
- Festlegung des Versuchsablaufs
  - Art des Strömungsfeldes, Datenauswertung
- Festlegung der Datenanalyse auf der Grundlage von
  - erforderlichen Ergebnissen gegenüber gemessenen Ergebnissen
  - Setup des Equipments und der Datenverarbeitung

# Schritt-für-Schritt-Anleitung

## Hardware-Setup

- 1 Festlegung des Überhitzungsgrades.
- 2 Messung der vorliegenden Temperatur, wenn Temperaturänderungen zu erwarten sind.
- 3 Falls notwendig, Test der Ansprechempfindlichkeit des Systems mit einem Rechteckwellentest
- 4 Festlegung des Tiefpass-Filters

## Geschwindigkeitskalibrierung

- 5 Beaufschlage die Sonde mit einer Reihe von bekannten Geschwindigkeiten und lege die Übertragungsfunktion fest.

## Richtungskalibrierung

- 6 Nur für 2- und 3-Drahtsonden und nur, wenn hohe Genauigkeit erforderlich ist. Andererseits können die vom Hersteller empfohlenen Gier- und Nickkoeffizienten verwendet werden.

## Datenumwandlung und Datenreduzierung

- 7 Die Übertragungsfunktion liefert die Kalibrierung der Geschwindigkeiten
- 8 Die Aufteilung der Geschwindigkeiten mittels Gier- und Nickkoeffizienten liefert die Geschwindigkeitskomponenten
- 9 Das Datenauswertungsmodul liefert die reduzierten Daten

## Festlegung des Experimentes

- 10 Wähle das Hardware-Setup aus.
  - Option 1: Regelung des Überhitzungsgrades, wenn Temperaturänderungen zu erwarten sind.
  - Option 2: Konstanthalten des Überhitzungswiderstandes (erfordert Temperaturkompensation wenn Temperaturänderungen auftreten)
- 11 Sondenbewegung: Festlegung eines Traversier-Gitters

## Festlegung der Datenerfassung

- 12 Datenrate und Anzahl der Messwerte

## Testdurchlauf

- 13 Sonde in der Strömung unterbringen und Messwerte aufnehmen. Überprüfung der reduzierten Daten (mittlere Geschwindigkeit, Standardabweichung usw.) im Vergleich zu erwarteten Werten.

## Versuchsdurchführung

- 14 Sonde an den Messort bewegen, Hardwareeinstellungen überprüfen, Sondenspannung messen.

## Datenumwandlung und -reduzierung

- 15 Daten einladen und ausgewählte Umwandlungs-/Reduzierungs-Routinen anwenden.

## Präsentation der Daten

- 16 grafische Darstellung der Daten oder Export.



## Sondenmontage und -orientierung

Die Sonde wird wie bei der Kalibrierung, in die Strömung montiert (Draht senkrecht und Haltesttiften parallel zur Strömung).

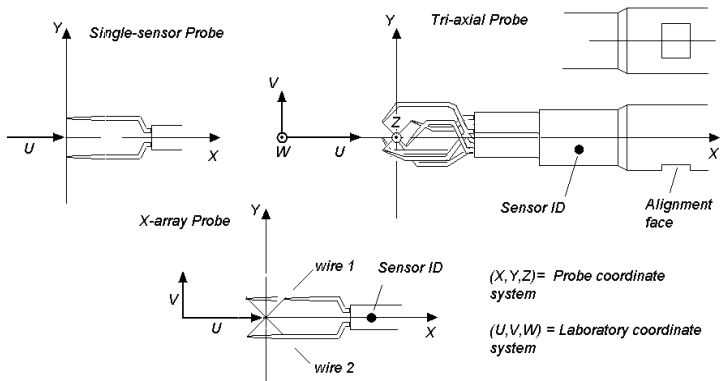
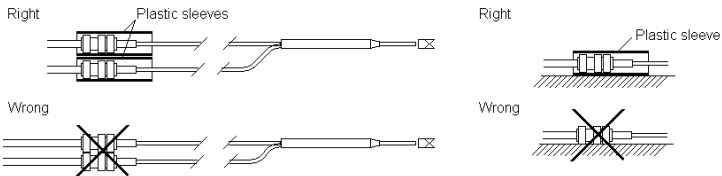


Abbildung: Sondenorientierung bezüglich des Labor-Koordinatensystems

# Verbindungskabel



**Abbildung:** Vermeidung von Erdungsschleifen und Geräuschaufnahme

## Erdung bei Messungen in Flüssigkeit

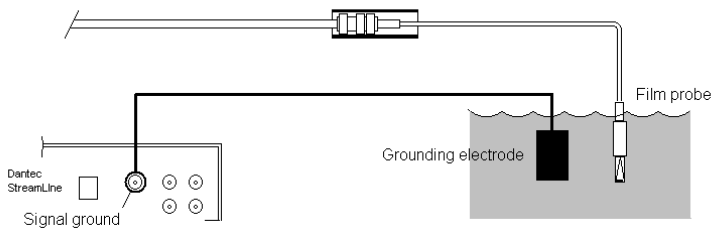


Abbildung: Erdung der Flüssigkeit

## Konfiguration der CTA-Brücke

### Standard-CTA-Brücke

Brückenverhältnis 1:20 Widerstände in Reihe mit der Sonde: normal 20 Ohm. Diese Brückenkonfiguration kann für die meisten Anwendungen genutzt werden.

### Symmetrische CTA-Brücke (für wissenschaftliche Zwecke)

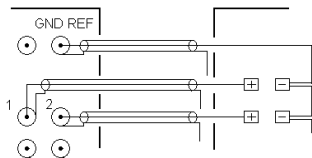
Brückenverhältnis 1:1. Widerstände in Reihe mit der Sonde: normal 20 Ohm. Diese Brücke wird für sehr niedrige Turbulenzintensitäten empfohlen (typischerweise kleiner 0,1%) oder sehr hohe Fluktuationsfrequenzen (typischerweise über 200-300 kHz), oder wenn lange Kabel zwischen Sonde und CTA benötigt werden. Sie weist ein niedrigeres Rauschen auf und kann auf eine größere Bandbreite abgeglichen werden als der 1:20-Typ.

## Hochleistungsbrücke (für wissenschaftliche Zwecke)

Brückenverhältnis 1:20 Widerstände in Reihe mit der Sonde: normal 10 Ohm. Empfehlenswert für Hochleistungs-Anwendungen (Wasser bei 1 m/s oder darüber). Der Sondenstrom ist meistens doppelt so groß (typisch 0,8 Ampere im Vergleich zu 0,4 - 0,5 Ampere).

*Multichannel Research CTA  
StreamLine Back Panel*

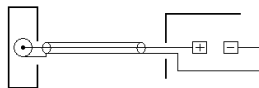
*A/D Termination board*



*Single-ended referenced*

*Single-channel  
Dedicated CTA*

*A/D Termination board*



*Differential connection*

**Abbildung:** Verbindung zwischen CTA-Ausgang und A/D-Wandler-Eingang

# Überhitzungsgrad

Festlegung der Arbeitstemperatur des Sensors:

$$a = \frac{R_w - R_0}{R_0}$$

$R_w$  Sensorwiderstand bei  $T_w$   
 $R_0$  Widerstand bei  $T_0$

Die Temperaturdifferenz  $T_w - T_0$  kann berechnet werden aus:

$$T_w - T_0 = \frac{a}{\alpha_0}, \text{ wobei } \alpha_0 \text{ der Wärmeübergangskoeffizient bei } T_0 \text{ ist.}$$

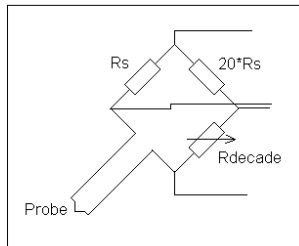
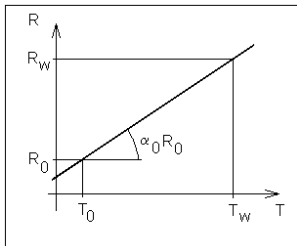


Abbildung: Einstellung des Überhitzungsgrades

## Brückenausgleich

- Messung des Gesamtwiderstandes  $R_{tot}$  bei  $T_0$  und Berechnung des Sensorwiderstandes:

$$R_0 = R_{tot,0} - (R_l + R_s + R_c)$$

- Auswahl eines geeigneten Überhitzungsgrades  $a$ .
  - $a = 0,8$  für Luft ( $T_{ue} \approx 220^\circ\text{C}$ )
  - $a = 0,1$  in Wasser ( $T_{ue} \approx 30^\circ\text{C}$ ).
- Berechnung des Dekadenwiderstandes:

$$R_{dec} = BR[(1 + a)R_0 + R_l + R_s + R_c]$$

BR: Brückenverhältnis = 20 (in den meisten Fällen)

- Einstellen des Dekadenwiderstandes auf  $R_{dec}$ .

## Mini-CTA 54T30: Selecting and adjusting overheat.

9054S4011

Org. 980528/TSV

Rev. 000607/TSV

CTA identification    prb.001 ch.1 -

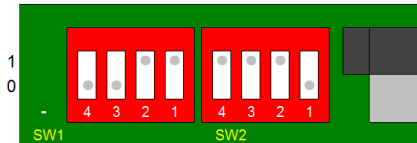
### Insert probe specific parameters etc.

Sensor resistance, $R_{20}$	3,90 $\Omega$	On probe box
Sensor lead resist., RL	0,50 $\Omega$	55P11/61 family
Support resistance, Rs	0,44 $\Omega$	Non standard
Cable resistance, Rc	0,20 $\Omega$	Cable 9006A1863
Sensor TCR, $\alpha_{20}$	0,36% /K	Standard tungsten
Desired wire temp., Tw	230 $^{\circ}\text{C}$	Wire mean temperature
Temperature of flow	30 $^{\circ}\text{C}$	Temperature during measurement

### Calculating wire operating resistance etc.

Over temperature, $\Delta T$	200 $^{\circ}\text{C}$
Operating resist., $R_w$	6,85 $\Omega$
Total resistance, $R_T$	7,99 $\Omega$
Overheat ratio, a	0,76
Bridge ratio, M	1:20
Decade resistance, $R_D$	159,8 $\Omega$

### Set decade controls as follows:



		80,1	79,7	79,7	79,7	39,7	19,7	8,49	2,89	0,09	0,09	$\Omega$
				157,9	80,1	40,0	20,0	11,20	5,60	2,79	1,40	$\Omega$
Actual wire temperature	229,7 $^{\circ}\text{C}$											
Actual operating resistance	6,84 $\Omega$	Tot:	159,67	<i>De sidste 2 værdier Interpoleres ^ ^</i>								111
		$\Delta =$	-0,09 $\Omega$	0	0	1	1	1	1	1	0	



# Einstellung des Überhitzungsgrades

## Abhängig vom Temperaturverhalten

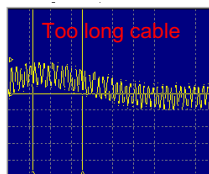
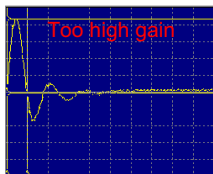
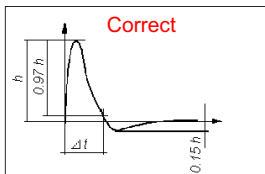
- Die Temperatur bleibt konstant ( $T_{var} < \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ):
  - Überhitzungsgrad wird einmalig eingestellt
  - Automatic overheat adjust - OFF
- Die Temperatur verändert sich (Kalibrierung/Experiment):
  - 1 Einstellung des Überhitzungsgrades:
    - Der Sondenwiderstand wird gemessen und der Überhitzungsgrad vor der Kalibrierung und vor jeder Messung neu eingestellt.
    - Automatic overheat adjust - ON.
  - 2 Temperaturkorrektur:
    - Der Überhitzungsgrad wird einmalig eingestellt.
    - Die Temperatur wird während der Kalibrierung gemessen und
    - für die Korrektur der Anemometerspannung benutzt

# Rechteckwellentest - dynamische Brückenabstimmung

## Durchführung des Rechteckwellentests

- Verstärkungsfilter und Verstärkung regulieren, wenn
  - Antwortfunktion ca. 15% überschwingt; glatt ohne Schwingungen
- $\Delta t$  bestimmen
  - auf ca. 3% des Maximalwertes herunterregulieren
- Bandbreite des Systems (cut-off frequency) berechnen [6]:  

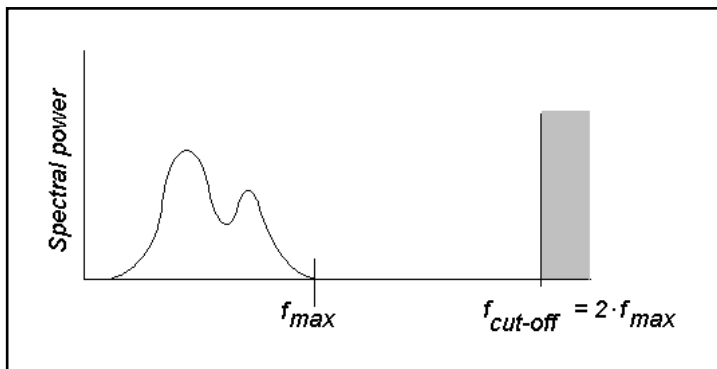
$$f_c = \frac{1}{C\Delta t}$$
 Drahtsonden:  $C = 1.3$ , Fiber-Filmsonden:  $C = 1$



# Tiefpassfilterung

Rauschen beseitigen; Aliasing verhindern

- Höchste Frequenz bestimmen:  $f_{max}$
- Aufnahmefrequenz wählen:  $f_{cutoff} = 2f_{max}$
- Filtereinstellungen in der Nähe der Aufnahmefrequenz wählen

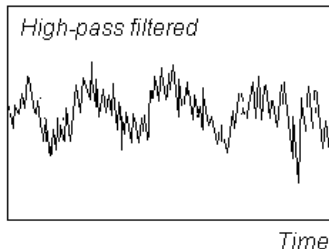
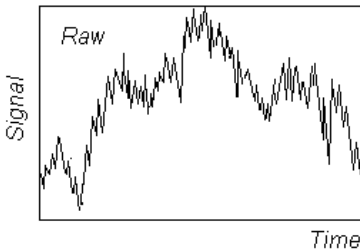


# Hochpassfilterung

## Bereinigung des Signals

Nur, wenn  $t_{Schwankung} > t_{record}$ , sonst nicht!

- Datenaufnahmelänge  $t_{record}$  wählen
- Hochpass-Aufnahmefrequenz berechnen:  $f_{cutoff} = \frac{5}{2 \cdot t_{record}}$



# DC-Offset

## Senkung des Niveaus des CTA-Signals

### Vorgehensweise

- den minimalen Wert  $E_{min}$  des zu messenden CTA-Signals bestimmen
- den DC-offset an der Signalbearbeitungseinheit auf  $E_{offset} = E_{min}$  stellen

### Hinweis

DC-offsets wenn möglich vermeiden

# Signalverstärkung (Gain)

## Verbesserung der Auflösung

### Vorgehensweise

- Notwendige Auflösung der Geschwindigkeit  $\Delta U$  in m/s bestimmen
- Mittleren Anstieg der Sonden-Kalibrierkurve in dem interessierenden Geschwindigkeitsbereich bestimmen:

$$\frac{dE}{dU} = \frac{E(U_2) - E(U_1)}{U_2 - U_1}, \quad \text{wobei } E(U) \text{ ist die CTA-Spannung bei } U$$

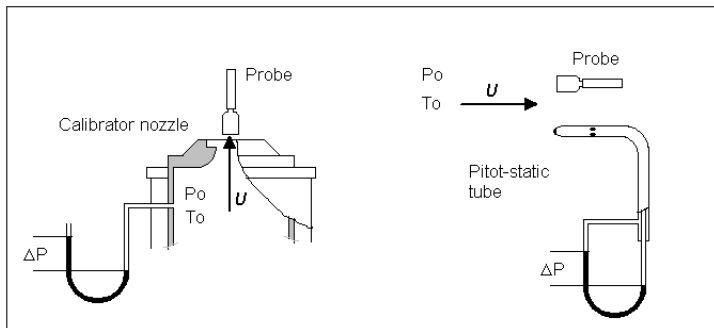
- erforderliche Auflösung der Spannung berechnen:

$$\Delta E = \Delta U \frac{dE}{dU}$$

- die Verstärkung  $G$  berechnen:

$$G = \frac{\Delta E_{AD}}{\Delta E}, \quad \text{wobei } \Delta E_{AD} \text{ ist die Auflösung des A/D-Wandlers}$$

## Durchführung der Geschwindigkeitskalibrierung

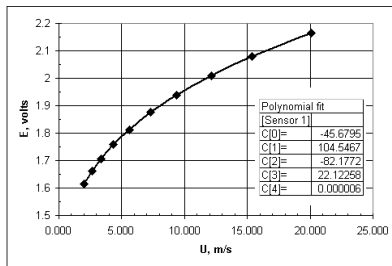


**Abbildung:** Referenzmessgeräte für Geschwindigkeitskalibrierung

## Durchführung der Geschwindigkeitskalibrierung

- Kalibrierungsbereich ( $U_{min}$ ,  $U_{max}$ ) wählen
- Anzahl der Kalibrierpunkte (min. 10) wählen
- Geschwindigkeitsverteilung (logarithmische empfohlen) wählen
- Geschwindigkeiten mit Hilfe des Referenz-Messgerätes einstellen
- $E$  zusammen mit  $U$  (ev.  $T$ ) aufzeichnen.

U	E	T	Pbar	Ecorr
m/s	volts	C	Pa	volts
2.019	1.614	26.0	100.652	1.615
2.622	1.661	26.0	100.654	1.662
3.358	1.705	26.0	100.66	1.706
4.360	1.758	25.9	100.663	1.759
5.621	1.813	25.9	100.66	1.814
7.324	1.876	25.9	100.654	1.877
9.379	1.939	25.9	100.652	1.94
12.121	2.01	25.9	100.652	2.011
15.364	2.08	25.9	100.657	2.081
20.101	2.166	25.9	100.657	2.167





## Anpassung mittels Polynom - für sehr gute Anpassungen

- $U(E_{korr})$  darstellen
- Trendlinie mit einem Polynom 4. Grades erzeugen:

$$U = C_0 + C_1 E_{korr} + C_2 E_{korr}^2 + C_3 E_{korr}^3 + C_4 E_{korr}^4$$

## Anpassung mittels Potenzgesetz

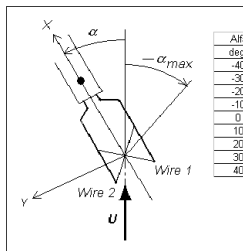
- $E^2(U^n)$  doppelt logarithmisch darstellen ( $n = 0.45$ )
- lineare Trendlinie festlegen:  
→  $A$  und  $B$  für  $E^2 = A + B \cdot U^n$  (King'sches Gesetz [3]).
- $n$  variieren und Trendlinie wiederholen bis Fehler akzeptabel ...

## Geschwindigkeitskalibrierung bei X- und 3-Draht-Sonden

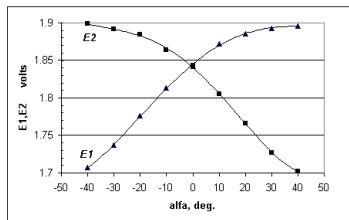
- Kalibrier-Geschwindigkeitsbereich muss erweitert werden:
  - hinsichtlich der erwarteten Geschwindigkeits-Limits
  - → Kurvenanpassung für den gesamten Winkelbereich gilt
- $U_{min,exp}$  und  $U_{max,exp}$  sind Spitzenwerte

	$U_{min,cal}$	$U_{max,cal}$
X-Draht-Sonden	$0.1 \cdot U_{min,exp}$	$1.5 \cdot U_{max,exp}$
3-Draht-Sonden	$0.15 \cdot U_{min,exp}$	$1.6 \cdot U_{max,exp}$

# X-Draht-Sonden

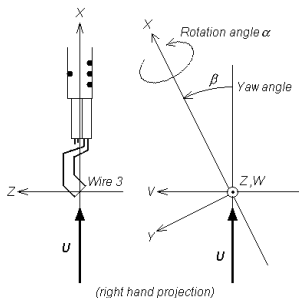


Alfa	E1	E2
deg.	volts	volts
-40	1.707	1.899
-30	1.737	1.892
-20	1.777	1.884
-10	1.813	1.864
0	1.842	1.843
10	1.872	1.805
20	1.886	1.766
30	1.893	1.727
40	1.896	1.703

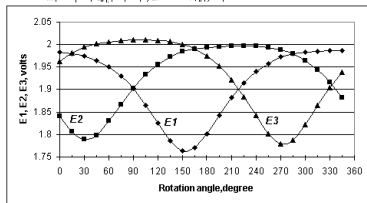


**Abbildung:** Winkeldefinitionen im X-Draht-Sonden-Koordinatensystem und Kalibrierdaten

## Drei-Draht-Sonden



Alfa	E1	E2	E3
deg.	volts	volts	volts
0	1.983	1.841	1.963
15	1.98	1.807	1.981
30	1.975	1.789	1.995
45	1.965	1.799	2.007



300	1.966	1.965	1.922
315	1.985	1.944	1.865
330	1.986	1.916	1.905
345	1.986	1.882	1.938

**Abbildung:** Winkeldefinitionen im 3-Draht-Sonden-Koordinatensystem und Kalibrierdaten

## Datenumwandlung

- Skalierung der gemessenen CTA-Spannungen (raw signal)

- nur bei Verstärkung oder Offset:  $E = \frac{E_a}{G} - E_{offset}$

- Temperaturkorrektur

- Nur bei Temperaturänderungen
  - wenn der Überhitzungsgrad nicht korrigiert wurde
  - Temperatureaufnahme nötig

$$E_{corr} = \left( \frac{T_w - T_0}{T_w - T_a} \right)^{0.5} \cdot E_a$$

- Linearisierung

- Nur wenn Datenreduzierung im Amplitudenbereich erforderlich ist
  - Polynom / Potenzgesetz

- Aufteilung in Geschwindigkeitskomponenten

- Nur bei X- oder 3-Draht-Sonden

## Beispiel für 3D-Sonden

Zerlegung:

$$k_1^2 \cdot U_1^2 + U_2^2 + h_1^2 \cdot U_3^2 = (1 + k_1^2 + h_1^2) \cdot \cos^2 54.74 \cdot U_{cal1}^2$$

$$h_2^2 \cdot U_1^2 + k_2^2 \cdot U_2^2 + U_3^2 = (1 + k_2^2 + h_2^2) \cdot \cos^2 54.74 \cdot U_{cal2}^2$$

$$U_1^2 + h_3^2 \cdot U_2^2 + k_3^2 U_3^2 = (1 + k_3^2 + h_3^2) \cdot \cos^2 54.74 \cdot U_{cal3}^2$$

Geschwindigkeitskomponente:

$$U_1 = \sqrt{-0.3477 \cdot U_{cal1}^2 + 0.3544 \cdot U_{cal2}^2 + 0.3266 \cdot U_{cal3}^2}$$

$$U_2 = \sqrt{0.3266 \cdot U_{cal1}^2 - 0.3477 U_{cal2}^2 + 0.3544 \cdot U_{cal3}^2}$$

$$U_3 = \sqrt{0.3544 \cdot U_{cal1}^2 + 0.32663 \cdot U_{cal2}^2 - 0.3477 \cdot U_{cal3}^2}$$

in Sonden-Koordinatensystem:

$$U = U_1 \cdot \cos 54.74 + U_2 \cdot \cos 54.74 + U_3 \cdot \cos 54.74$$

$$V = -U_1 \cdot \cos 45 - U_2 \cdot \cos 135 + U_3 \cdot \cos 90$$

$$W = -U_1 \cdot \cos 114.09 - U_2 \cdot \cos 114.09 - U_3 \cdot \cos 35.26$$

# Datenerfassung

## CTA-Signal - kontinuierliche analoge Spannung

→ Digital/Analog-Wandler

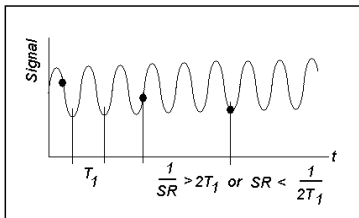
- Datenrate  $SR$  und
- Anzahl der Messwerte  $N$
- Zusammen legen sie die Messzeit  $T = \frac{N}{SR}$  fest.

## Parameter, die die Datenerfassung definieren

- Experiment
- verfügbares Speichervolumen des Computers
- die akzeptable Messunsicherheit
- erforderlichen Datenanalyse (zeitgemittelt oder frequenzgemittelt)

## Zeitgemittelte Auswertung

- erwartete Werte abschätzen:  $U$  [m/s],  $Tu$  [%],  $T_1$  [s]
- gewünschte Messunsicherheit  $u$  [%] von der mittleren Geschwindigkeit  $U_{mean}$  und den Vertrauensbereich  $(1-a)$  [%] auswählen.
- Datenrate berechnen:  $SR \leq \frac{1}{2T_1}$
- Anzahl der Messwerte berechnen:  $N = \left(\frac{1}{u} \cdot \frac{z_a}{2} \cdot Tu\right)^2$



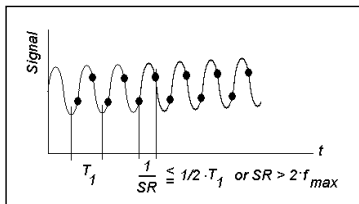
$z_a/2$	$(1-a)$ %
1.65	90
1.96	95
2.33	98



## Datenrate bei zeitlicher Spektralanalyse

Datenrate berechnen:

- Nyquist-Kriterium mit  $f_{max}$  basierend auf einer zu stark abgetasteten (oversampled) Zeitreihe:  $SR \geq 2f_{max}$
- auf Grund einer Tiefpassfilter-Einstellung:  $SR = 2f_{cutoff}$
- der Faktor 2,5 wird bei einem nicht idealen Tiefpass-Filter verwendet, der das Signal bei der cut-off-Frequenz nicht auf Null setzt:  $SR = 2.5f_{cutoff}$



# Datenanalyse

## stochastische Natur des CTA-Signal einer turbulenten Strömung

→ eine statistische Beschreibung des Signals notwendig

Die Zeitreihe kann analysiert oder reduziert werden:

- im Wertebereich der Amplitude,
- der Zeit oder
- der Frequenz.

Die reduzierten Daten können

- in dem Projekt gespeichert,
- grafisch dargestellt,
- exportiert werden.

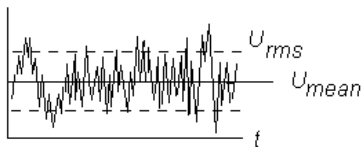
# Datenanalyse im Amplitudenbereich

mittlere Geschwindigkeit:  $U_{mean} = \frac{1}{N} \sum_1^N U_i$

Standardabweichung der Geschwindigkeit:

$$U_{rms} = \left( \frac{1}{N-1} \sum_1^N (U_i - U_{mean})^2 \right)^{0.5}$$

Turbulenzgrad:  $Tu = \frac{U_{rms}}{U_{mean}}$



# Datenanalyse im Amplitudenbereich

Schiefe (skewness):

$$S = \sum_1^N \frac{(U_i - U_{mean})^3}{N \cdot \sigma^3}$$

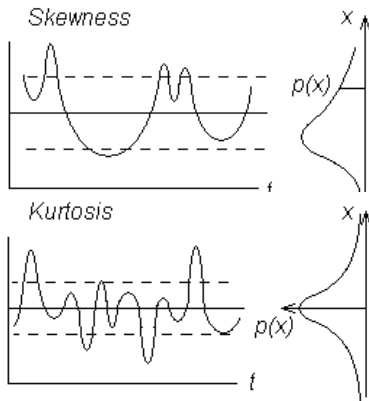
Flachheit (flatness):

$$K = \sum_1^N \frac{(U_i - U_{mean})^4}{N \cdot \sigma^4}$$

wobei die Varianz  $\sigma$  definiert ist als:

$$\sigma = \left( \sum_1^N \frac{(U_i - U_{mean})^2}{N - 1} \right)^{0.5}$$

Die Schiefe ist ein Maß für das Fehlen einer statistischen Symmetrie in der Strömung, während die Flachheit ein Maß für die Amplitudenverteilung ist.



# Datenanalyse im Zeitbereich

Erfordert eine lange Zeitskala  $x(t)$ , die unter Beachtung des Nyquist-Kriteriums aufgenommen wurde.

Autokorrelationsfunktion:

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot x(t + \tau) \cdot dt$$

Integrale Zeitskala:

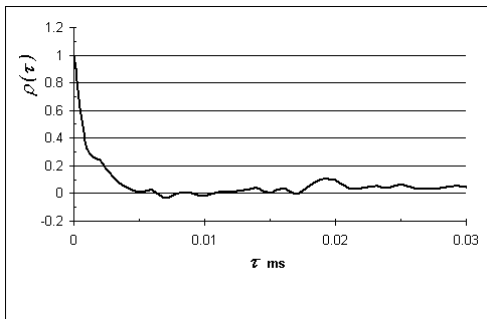
$$T_1 = \int_0^{\infty} \rho_x(\tau) \cdot d\tau$$

wobei der Autokorrelations-Koeffizient definiert ist:

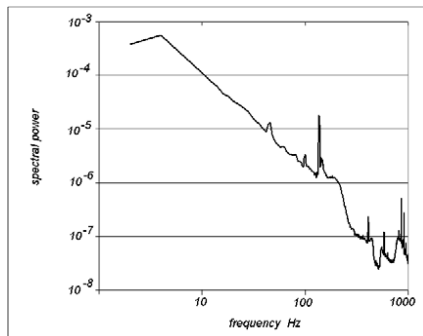
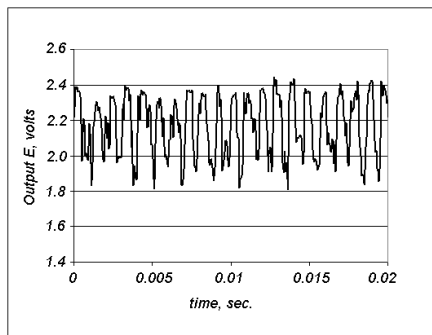
$$\rho_x(\tau) = \frac{R_x(\tau)}{R_x(0)}$$

**Hinweis:**

Die Autokorrelation kann mit nichtlinearisierten Rohdaten durchgeführt werden.



# Datenanalyse im Spektralbereich



# Störeinflüsse

## Durch die Strömung

- Temperatur - sehr wichtig!
- Druck - vernachlässigbar
  - Druckänderungen
  - Druckbereich
- Zusammensetzung - vernachlässigbar

## Sensorbedingungen

- Verschmutzung - neue Kalibrierung
- Sensorstabilität - Empfindlichkeit betrachten
- Sensororientierung - Kalibrierung=Messung!!!

## Unsicherheiten bei CTA-Messungen (1)

Quelle der Unsicherheit	Eingangsgroße	Typischer Wert	Relative Ausgangsgröße	Typischer Wert	Übedeckungsfaktor	Relative Standard-Unsicherheit
	$\Delta x_i$	$\Delta x_i$	$\frac{1}{U} \cdot \Delta y_i$	$\frac{1}{U} \cdot \Delta y_i$	$k$	$\frac{1}{k} \cdot \frac{1}{U} \cdot \Delta y_i$
Kalibrier- vorrichtung	$\Delta U_{cal}$	1%	$2 \cdot STDV(100 \cdot \Delta U_{cal})$	0.02	2	0.01
Lineari- sierung	$\Delta U_{fit}$	0.5%	$2 \cdot STDV(100 \cdot \Delta U_{fit})$	0.01	2	0.005
A/D- Auflösung	$E_{AD}$ $n$	10 volts 12 bit	$\frac{1}{U} \cdot \frac{E_{AD}}{2^n} \cdot \frac{\partial U}{\partial E}$	0.0008	$\sqrt{3}$	0.0013
Sonden- positio- nierung	$\theta$	$1^\circ$	$1 - \cos \theta$	$0.0001$ 5	$\sqrt{3}$	$\approx 0$



## Unsicherheiten bei CTA-Messungen (2)

Quelle der Unsicherheit	Eingangsgröße	Typischer Wert	Relative Ausgangsgröße	Typischer Wert	Überdeckungs-faktor	Relative Standard-Unsicherheit
Temperaturänderungen <sup>1)</sup>	$\Delta T$	1°C	$\frac{1}{U} \cdot \frac{\Delta T}{(T_w - T_0)} \cdot \left( \frac{A}{B} \cdot U^{-0,5} + 1 \right)$	0.013	$\sqrt{3}$	0.008
Temperaturänderungen <sup>2)</sup>	$\Delta T$	1°C	$\frac{\Delta T}{273}$	0.004	$\sqrt{3}$	0.002
Umgebungsdruck	$\Delta P$	10kPa	$\frac{P_0}{P_0 + \Delta P}$	0.01	$\sqrt{3}$	0.006
Feuchtigkeit	$\Delta P_{wv}$	1 kPa	$\frac{1}{U} \cdot \frac{\partial U}{\partial P_{wv}} \cdot \Delta P_{wv}$	0.0006	$\sqrt{3}$	$\approx 0$
Relative erweiterte Unsicherheit <sup>3)</sup> : $U(\text{Usample}) = 2 \cdot \sqrt{\sum \left( \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{U} \cdot \Delta y_i \right)^2} = 0.030 = 3\%$						

## Weiterführende Aufgabenstellungen

- Sehr langsame Geschwindigkeiten: Der Einfluss der natürlichen Konvektion beginnt bei ca. 0.2 m/s und ist vollständig ausgeprägt bei 0,03 bis 0,04 m/s. In diesem Bereich ist es wichtig, dass die Sonde bei der Kalibrierung und bei der Messung die gleiche Orientierung zum Geschwindigkeitsfeld hat.
- Hohe Geschwindigkeiten, kompressible Strömungen: Geschwindigkeit und Druck müssen simultan gemessen werden. Die Korrektur ist ziemlich kompliziert und wird oft vernachlässigt [33, 48, 55].
- Niedriger Druck: Wenn die Knudsen-Zahl sich über 0,1 erhöht, wird der Wärmeübergang eine Funktion sowohl der Geschwindigkeit als auch der Knudsen-Zahl (oder Druck). Bei einer 5  $\mu\text{m}$ -Sonde beträgt die Knudsen-Zahl etwa 0,02 unter atmosphärischen Bedingungen.

## Weiterführende Aufgabenstellungen

- Wandeinflüsse: Der Wandeinfluss beginnt bei  $y^+ \leq y U_\tau = 3,5$  ( $y$  = Wandabstand,  $U_\tau$  = Reibungsgeschwindigkeit). Der kritische Wandabstand beträgt typischerweise 0,1 bis 0,2 mm und ist abhängig von der Geschwindigkeit in der freien Strömung.
- Sehr hohe Turbulenzen, Rückströmungen: → fliegende Sensorsysteme.
- Wandschubspannung: wandschlüssig angeordnete Filmsonden.
- Zweiphasenströmungen: jeweilige Phase bestimmbar.
- Gemische: Gemischanteile können bestimmt werden.