

# Einführung in die Sensorik & Messtechnik in der Geomatik



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

## Programm Herbstsemester 2009

Datum	Ort	Vortragender	Thema
21.09.2009	HIL D 55.2	Ingensand	Grundlagen elektronischer Messsysteme
28.09.2009	HIL D 55.2	Ingensand	Digitalnivelliere
05.10.2009	HIL D 55.2	Haberecht	Hydrostatische Messsysteme, mit Demonstration
12.10.2009	HIL D 55.2	Schutz	Vermessungskreisell
19.10.2009	HIL D 55.2	Ingensand	EDM
26.10.2009	HIL D 55.2	Ingensand	Encoder und Elektronische Neigungsmesser
02.11.2009	HIL D 55.2	Ingensand	Trackende polare Messsysteme
09.11.2009	HIL C 71.3	Ingensand	Halbleiter und Optoelektronik
16.11.2009	HIL D 55.2	Ingensand	Digitalelektronik
23.11.2009	HIL C 71.3	Sorber	Datenübertragung, Schnittstellen, Hardwarekomponenten, Protokolle
30.11.2009	HIL D 55.2	Ingensand / Oesch	Qualitätssicherung und Kalibrierung Kalibriereinrichtungen IGP- Messlabors
07.12.2009	HIL C 71.3	Sandholzer (4h)	Signalverarbeitung am Beispiel von GPS Receivern
14.12.2009			Kompensation 07.12.2009



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

## Einführung in die Sensorik & Messtechnik in der Geomatik

- Einführung (Testatbedingungen, Script, Unterlagen, Literatur)
- Sensoren in aktuellen Messinstrumenten (Beispiele)
- Begriffe und Definitionen
  - Sensor, Module, Komponente, Messinstrument
- Was ist ein Sensor?
- Umformungsverfahren
- Basiseffekte
  - resistiv, kapazitiv, induktiv, .....
- Die Messkette
  - Anpassschaltungen
  - Verstärker
  - A/D Wandler



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

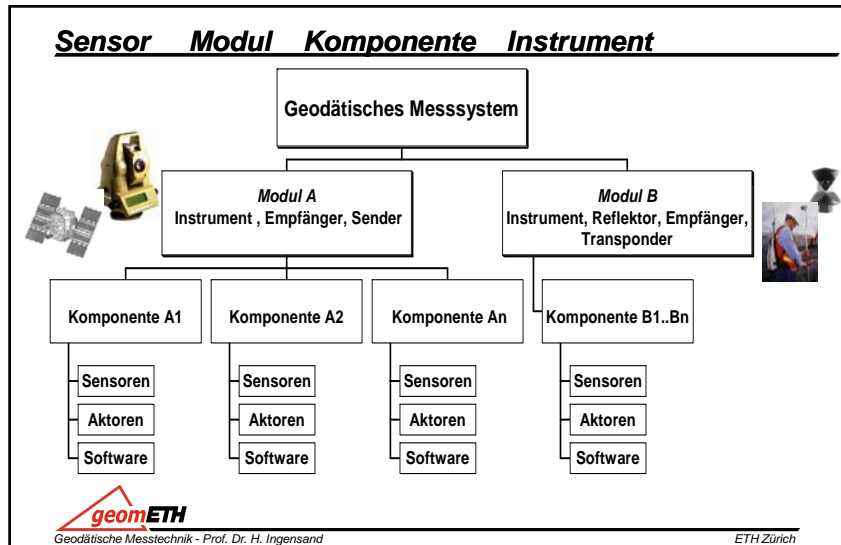
ETH Zürich

## Strukturen, Begriffe, Definitionen



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich



### Begriffe: Messgerät /Instrument

- **Messgerät**  
Gerät zur quantitativen Erfassung von physikalischen., chemischen und anderen Erscheinungen und Eigenschaften. Nach ihrem Wirkungsprinzip wird v. a. zw. mechanischen, pneumatischen, elektrischen und optischem Messgerät unterschieden.
- **Instrument**  
[lat. "Ausrüstung"], Mittel oder Gerät zur Ausführung bestimmter wissenschaftlicher oder technischer Arbeiten.

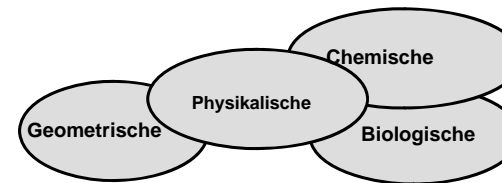
### Die Hauptgebiete der Sensorik

- **Geometrische Sensoren (Geomatik)**
  - Distanz (absolut oder Änderung)
  - Absolute Position
  - differentielle Position
  - Winkelgeber
  - Neigungsgeber.
- **Physikalische Sensoren (z.B: Umwelt)**
  - Meteosensoren (Temperatur, Luft\_Druck, Feuchte)
  - Magnetfeldsensoren
  - gravimetrische Sensoren
  - Schwingungs-Beschleunigungssensoren
  - Kreisel
- **Chemische Sensoren**
  - PH Wert
- **Bio-Sensoren**
  - Lactat und Sulfit

### Die Messgrößen

Die Messgröße ist die primäre Größe, die durch die Messung erfasst werden soll.

Oftmals kann diese primäre Größe nur indirekt erfasst werden, indem Sekundäreffekte genutzt werden → indirekte Messverfahren



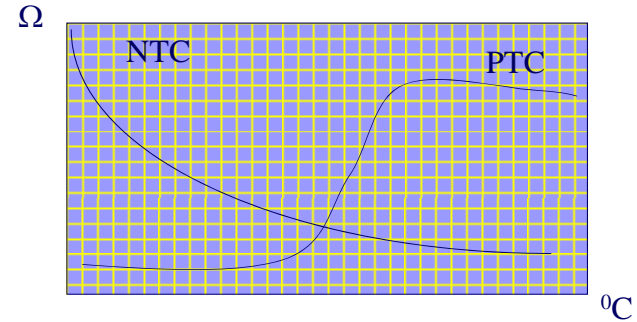
**Sensorvielfalt für eine Messgröße (indirekte Effekte)**

**Temperatursensoren**

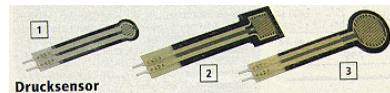
- thermoelektrische Sensoren  
Thermokraft, - Thermoelemente, - Leistungs-thermoelemente (Spannungen)
- resistive Temperatursensoren:  
Metallwiderstände, - Halbleiterwiderstände, - Heissleiter - Kaltleiter, Transistoren als Temperatursensoren (Widerstand)
- Pyroelektrische Temperatursensoren (Frequenzänderung)
- Quarz-Temperatursensoren (Frequenzänderung)
- faseroptische mechanische und chemische Temperatursensoren

**Widerstandsveränderung zur Temperaturmessung**

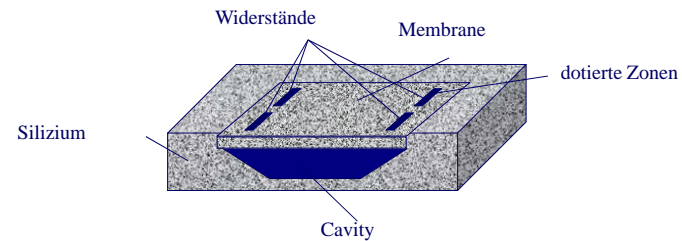
Halbleitersensoren



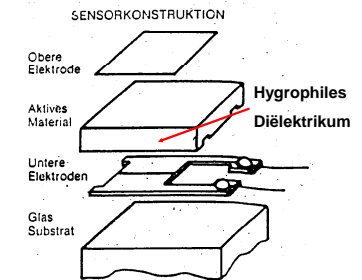
**Beispiel: Messung des Luftdrucks**



Drucksensor



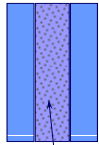
**Beispiele: Kapazitiver Feuchtesensor**



## Feuchtesensoren und verschiedene Effekte

Kapazitiv

Kondensator



Hydrophiles Material

“Humicap”



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

Taupunktverfahren

Laserstrahl



Peltierelement

“dew point mirror”

ETH Zürich

## Definition “Sensor”

- Der **Sensor** ist ein technisches Bauteil, das aus einem physikalischen nichtelektrischen Messsignal ein eindeutiges elektrisches Signal erzeugt
- **Sensor (Messfühler)** d.h. derjenige Teil einer Meß- oder Registriervorrichtung, der unmittelbar der zu messenden oder zu erfassenden Größe ausgesetzt wird; auch Bezeichnung für eine auf elektromagnetische Strahlung (z. B. Infrarot-Sensor) oder bei Berührung (z. B. Sensortaste) ansprechende Vorrichtung. ( *Meiers Lexikon*)
- **Transducer** device that converts input energy into output energy, the latter usually differing in kind but bearing a known relation to input. Originally, the term referred to a device that converted mechanical stimuli into electrical output, but it has been broadened to include devices that sense all forms of stimuli-such as heat, radiation, sound... ( *Encyclopedia Britannica*)



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

Die Französischen Begriffe: TRANSDUCTEUR, CAPTEUR ,ENREGISTREUR

ETH Zürich

## Sensorkategorisierung nach:

- *Der Funktion der Umwandlung (optisch, elektrisch,..)*
- *Bauart ( Halbleiter-, Piezo-,Ohm,kapazitiv,induktiv....)*
- *Größen (geometrische, physikalische,..)*
- *Art der Information (absolut, relativ, differentiell)*
- *Messprinzip (analog oder digital)*
- *Übertragungsfunktion (1. oder 2. Ordnung)*



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

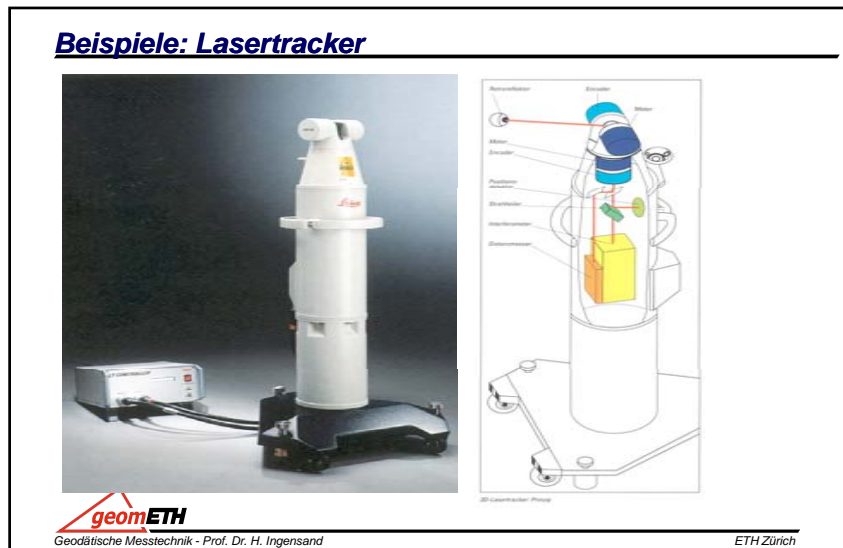
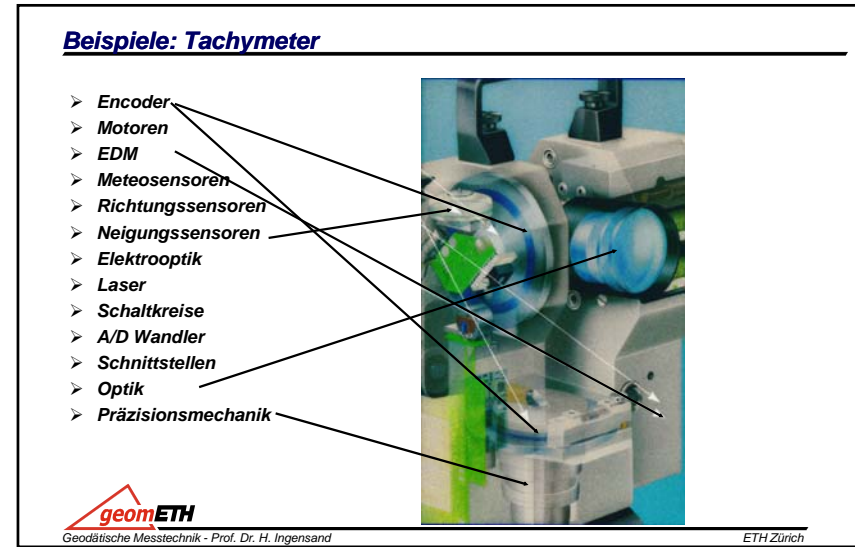
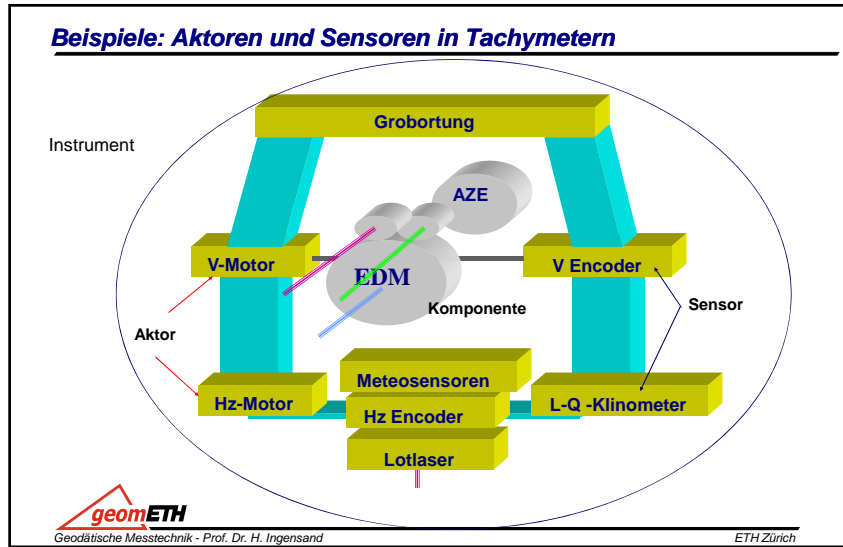
ETH Zürich

## Beispiele



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich



### Theodolitähnlicher 3D-Scanner: Callidus

**Hardware**

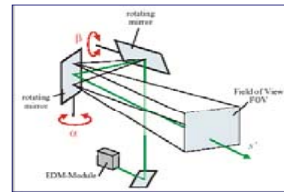
- Messkopf
  - Laserscanner
  - integrierte Kameraeinheit
  - Neigungssensor
  - elektronischer Kompass
- Laserklasse 1
- Staub- und spritzwassergeschützt
- 13 kg

**Verfahren**

- Pulslaufzeitmessung
- Richtung
- Überwachung des Vorgangs in Echtzeit durch integrierte Kamera

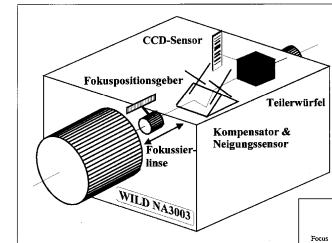
geomETH  
Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand  
ETH Zürich

### Zeilenscan und Pulslaufzeitverfahren: Scanstation



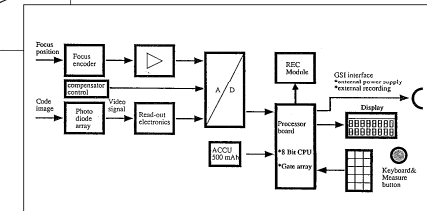
Aus Staiger  
FIG2002

### Beispiele :Digitalnivellier

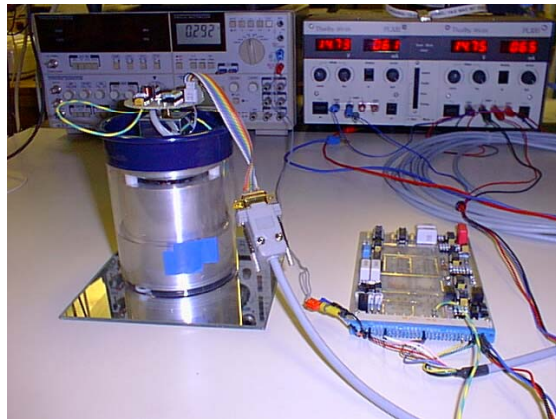


Hardware

Elektronik

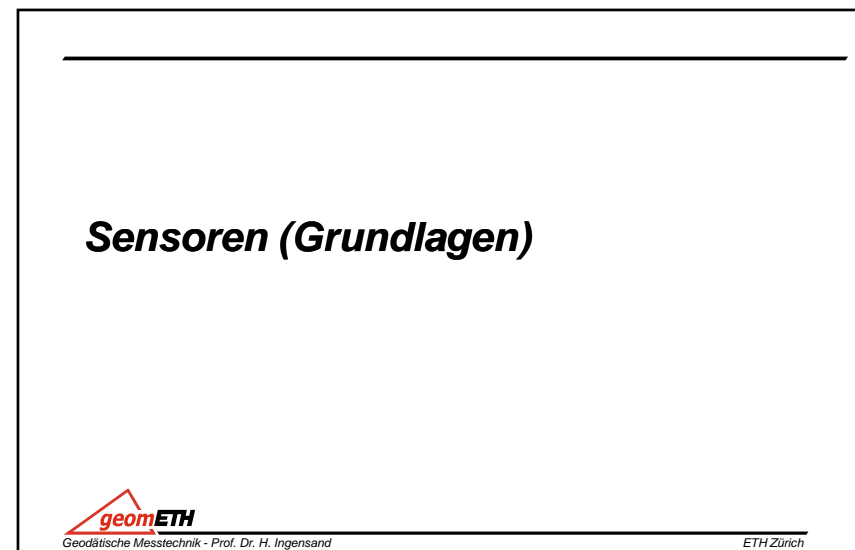
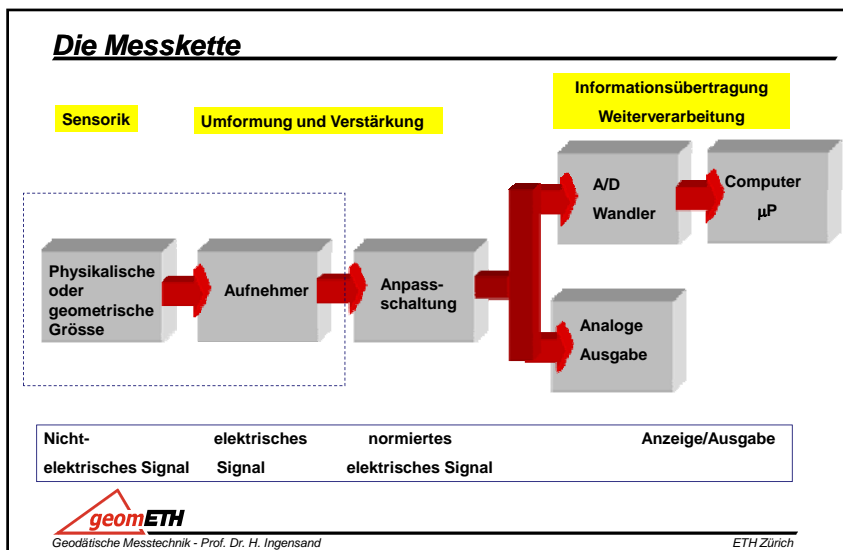
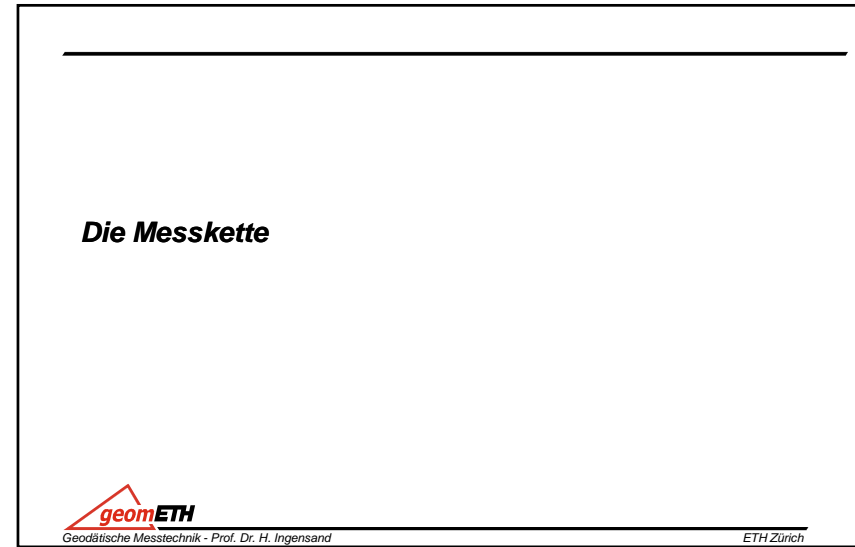
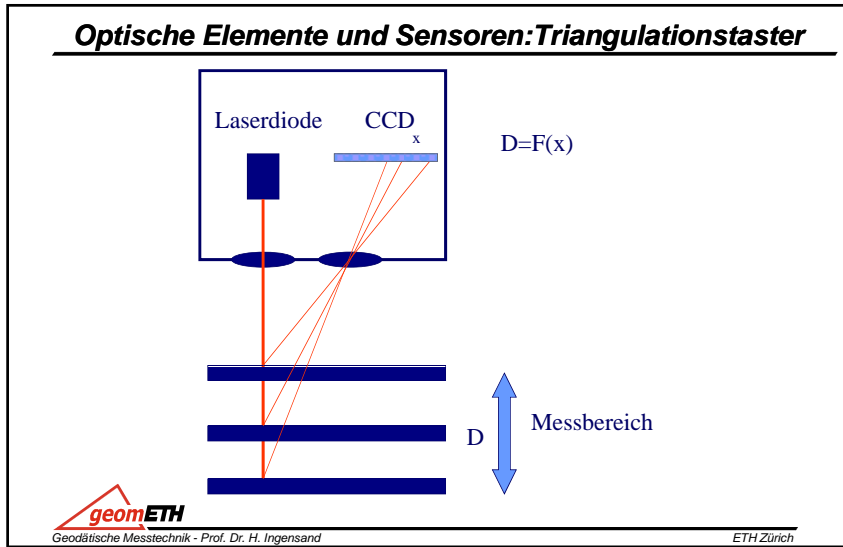


### Beispiel: Hydrostatisches Höhenmesssystem



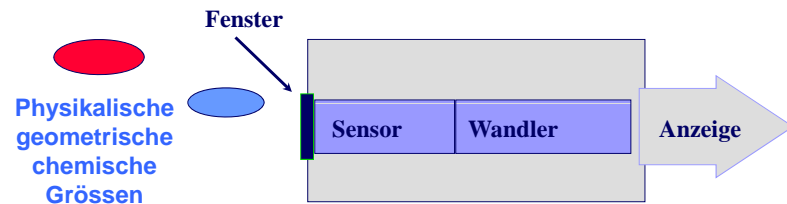
### Kalibrierung von Sensoren



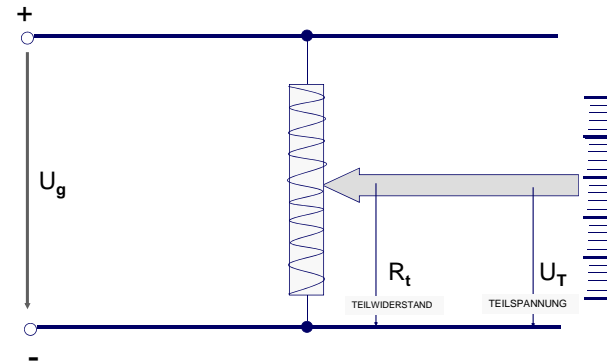


### Grundfunktion eines Sensors

Ein Sensor sollte aus seiner Umgebung die spezifischen Messgrößen herausfiltern  
 In den meisten Fällen sind dieses keine elektrischen Größen, so dass die Messgröße in eine elektrisch messbare Größe umgeformt werden muss

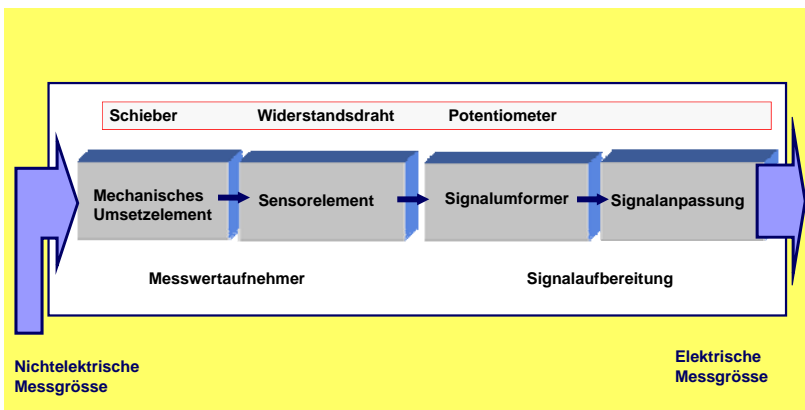


### Einfache Sensoren: "Ohm'sche Positionsmessung"

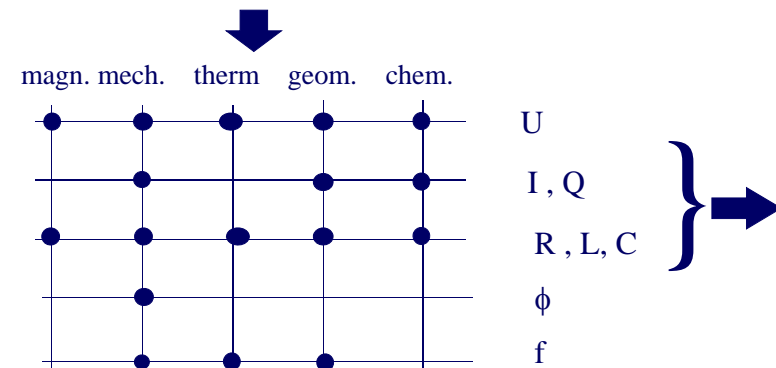


Demonstration: Drehpotentiometer

### Aufbau eines Sensors „Linearer Weggeber“

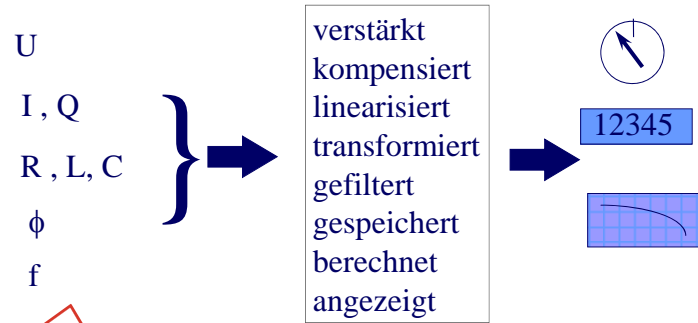


### Transformationsmatrix: Eingangsgrößen vs. Ausgangsgrößen





**Die elektrischen Grössen werden:**

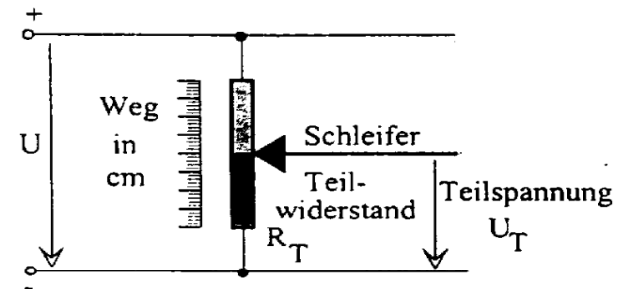


**Mechanisch/physikalisch-elektrische Umformung**

**Analoge elektrische Positions- und Temperatursensoren**

- > Resistive
- > Induktive
- > Kapazitive

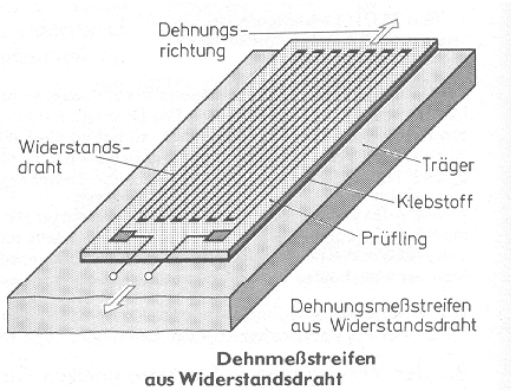
**Einfache Sensoren: Ohm'sche Positionsmessung**



Potentiometer

Aus Schlemmer

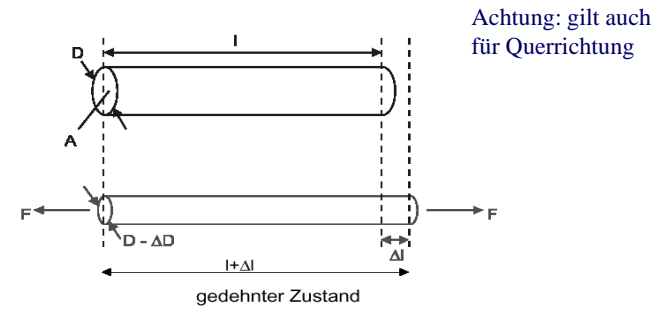
### Dehnungsmesstreifen



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

### DMS Drahtlängenänderung



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

### Der DMS Effekt

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

R= Widerstand

ρ=Materialkonstante

l= Länge

A= Querschnitt=D<sup>2</sup>·π/4

$$R = \rho \cdot \frac{l \cdot 4}{D^2 \cdot \pi}$$



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

### DMS Herleitung

$$dR = \frac{\partial R}{\partial \rho} \cdot d\rho + \frac{\partial R}{\partial l} \cdot dl + \frac{\partial R}{\partial D} \cdot dD$$

$$dR = \frac{l}{1/4 \cdot D^2 \cdot \pi} \cdot d\rho + \dots$$

relative Widerstandsänderung

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} - \frac{dl}{l} - 2 \cdot \frac{dD}{D}$$

umgeformt, da man die Widerstandsänderung zur Längenänderung wissen will

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} \cdot \underbrace{\left( 1 - 2 \cdot \frac{dD/D}{dl/l} - \frac{d\rho/\rho}{dl/l} \right)}_k$$



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

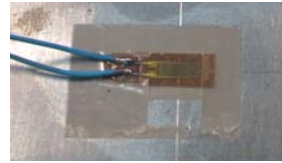
### Aufbau von Dehnungs Mess Streifen

3 Grundtypen: • Metallische DMS

- Halbleiter DMS
- aufgedampfte DMS

#### Metallische DMS:

Früher wurden metallische DMS mittels Drähten gefertigt. Heute werden im Bauwesen meist Folien-DMS verwendet. Das Messgitter des Folien-DMS hat eine Dicke von 3-5 µm.



Folien - DMS

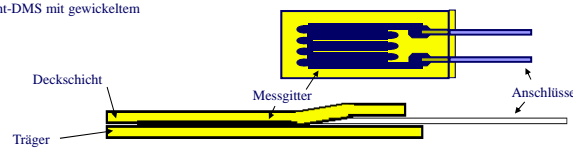
#### Halbleiter DMS:

Die Messempfindlichkeit dieser DMS Type ist bis zu  $10^5$  mm/m. Das Messprinzip beruht auf dem Piezowiderstandseffekt.

#### Aufgedampfte DMS:

Der DMS wird unter Vakuum durch Verdampfen seiner Legierungsbestandteile an die Messstelle angebracht. Verwendet wird diese DMS Type für die Bauelemente spezieller Messgrößenaufnehmer.

Prinzipieller Aufbau eines Draht-DMS mit gewickeltem Messgitter:



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

### Messung Kleiner Wege: DMS

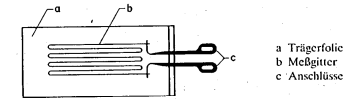


Fig. 2.1 Charakteristische Bauform eines DMS mit aus Draht gewickeltem Messgitter

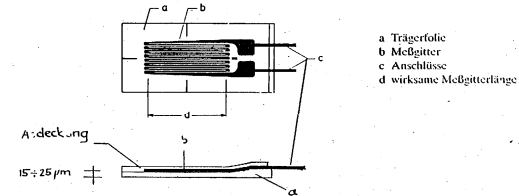


Fig. 2.2 Charakteristische Bauform eines DMS mit aus Metallfolie geätztem Messgitter



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

### Widerstandsthermometer

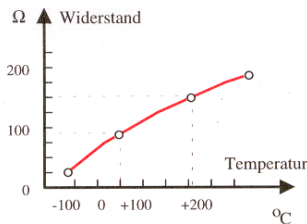


Abb. 2.19 Widerstands-Temperatur-Kennlinie eines Platin-Widerstandes

**Temperaturmessung:** Bei der elektronischen Entfernungsmessung gehört die genaue Erfassung der Temperatur längs des Wellenweges zu den wichtigsten Problemen. Um dieses einer Automatisierung zuzuführen, bzw. die Ablesung zu vereinfachen, werden zunehmend Widerstandsthermometer verwendet. Sie bestehen im wesentlichen aus einem elektrischen Widerstand, der eine bekannte Temperaturabhängigkeit zeigt. So ist z.B. in der Abbildung 2.19 die Widerstands-Temperatur-Kennlinie eines Platin-Widerstandes gezeigt. Diese Kennlinie kann in dem Temperaturbereich von  $-20^{\circ}\text{C}$  bis  $+50^{\circ}\text{C}$  durch folgende Interpolationsformel angenähert werden:

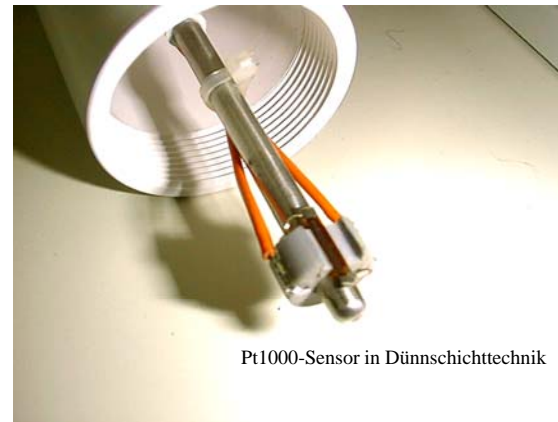
Aus Schlemmer



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

### Widerstandsthermometer



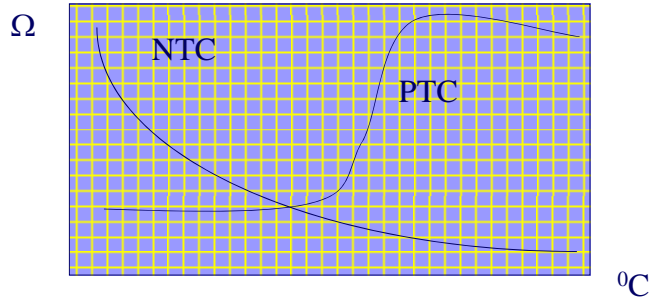
Pt1000-Sensor in Dünnschichttechnik



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

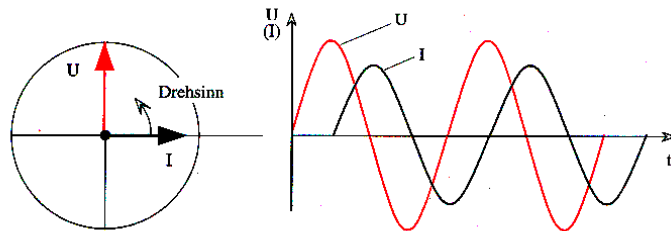
ETH Zürich

**Widerstandsveränderung in Halbleitern zur Temperaturmessung**



**Sensoren im Wechselstromkreis**

**Wechselspannung**



Zeigerbilddarstellung des Wechselstroms

Aus Schlemmer

**Widerstandsändernde Sensorelemente im Wechselspannungskreis**

Begriff	Bauelemente	Elektrischer Effekt
Induktion	Spulen	Phasenverschiebung
Kapazität	Kondensatoren	Phasenverschiebung

### Der komplexe Widerstand im Wechselstromkreis

$$Z = |Z| \cdot e^{i\varphi}$$

$\varphi$  = Winkel Zwischen realem Widerstand und imaginärem Widerstand

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}$$

$R \ll$  Imaginäranteile

Betrag

$\omega$  = Frequenz

D.H.: Der Effekt ist abhängig von der Frequenz (Trägerfrequenz) und der Induktionsänderung bzw Kapazitätsänderung

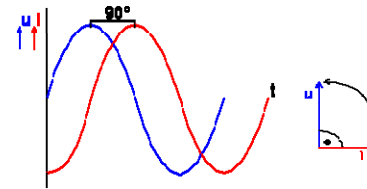


Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

### Der Blindwiderstand im Wechselstromkreis

#### Spule an sinusförmiger Wechselspannung



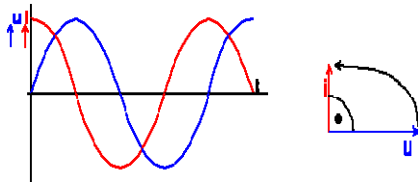
Die Spule verändert die Kurvenform eines sinusförmigen Signals nicht!  
Die Spannung eilt dem Strom jedoch um 90° voraus.



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

### Kondensator an sinusförmiger Wechselspannung



Der Kondensator verändert die Kurvenform einer sinusförmigen Wechselspannung nicht!

Der Strom eilt der Spannung jedoch um 90° voraus.

#### Kapazitiver Blindwiderstand:

Der kapazitive Blindwiderstand  $Z_C$  ist umso größer,

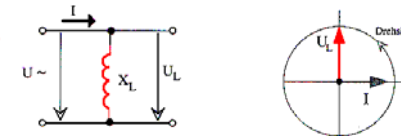
- je kleiner die Frequenz  $f$
- je kleiner die Kapazität  $C$



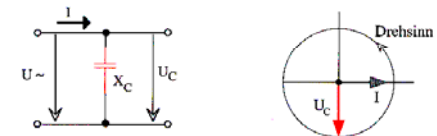
Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

### Der Blindwiderstand im Wechselstromkreis



Wechselstromkreis mit induktivem Widerstand



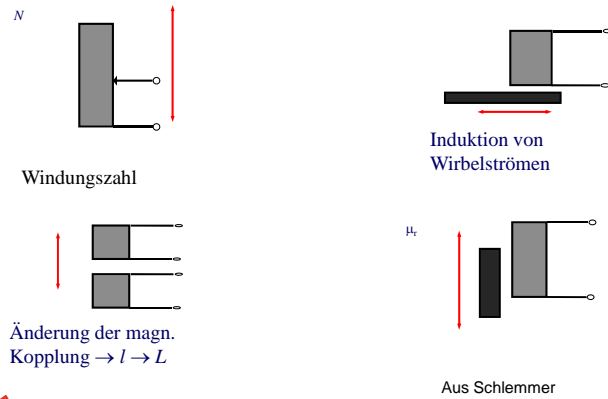
Wechselstromkreis mit kapazitivem Blindwiderstand



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

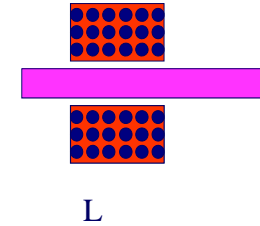
## Induktive Sensoren



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

## Messung kleiner Wege: Tauchspule



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

## Induktivität

$$L = \frac{N^2 \mu_0 \mu_r A}{l}$$

$N$  = Windungszahl

$\mu_0$  = absolute Permeabilität

$\mu_r$  = relative Permeabilität

$A$  = Fläche der Spule

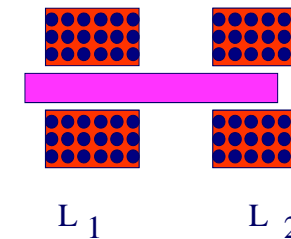
$l$  = Länge der Spule



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

## Messung kleiner Wege: Differential-Tauchspule



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

### Differentielle Induktive Wegaufnahme

$L_1 + \Delta l$  und  $L_2 - \Delta l$

Spannungsteiler im Wechselstromkreis

$$U = \frac{R + i\omega(L + \Delta l)}{2(R + i\omega L)} \cdot U_s$$

$$U = \left[ \frac{1}{2} + \frac{\omega \Delta l}{2\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \cdot e^{i\phi} \right] \cdot U_s \text{ mit } \tan \phi = R/\omega L$$

$$U = \left[ \frac{1}{2} + \frac{\Delta l}{2L} \right] \cdot U_s$$

Wenn  $R \ll L$  dann spielt Phasenverschiebung in Differentialanordnung keine Rolle, da sie sich aufhebt



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

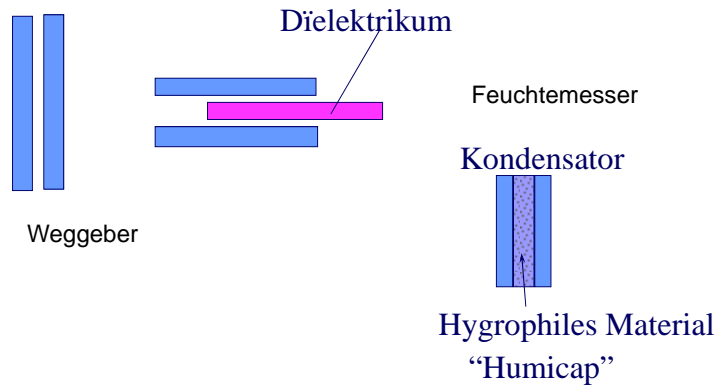
### Kapazitive Sensoren



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

### Kondensatorbasierende Sensoren



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

### Der Kondensator als Weggeber

$$C_0 = E_0 \cdot E_r \cdot \frac{A}{D}$$

$$E_0 = 8.859 \text{ pF / m (elektrische Feldkonstante)}$$

$E_r$  = relative Dielektrizitätskonstante

A = wirksame Kondensatorfläche

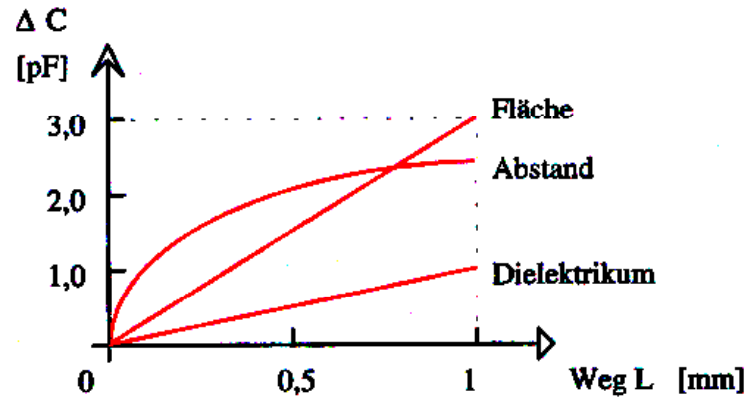
d = Abstand der Platten



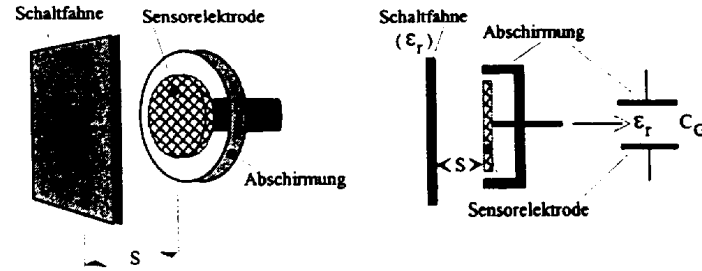
Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

### Kennlinien kapazitiver Sensoren

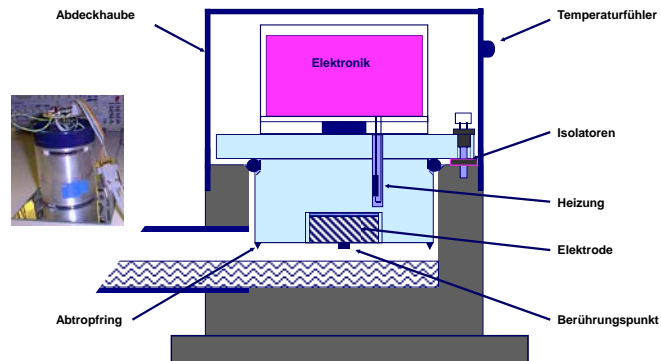


### Kapazitive Weggeber

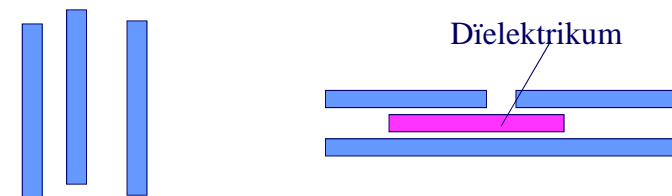


Kapazitive Sensoren als Näherungsschalter

### Kapazitiver HLS Sensor



### Messung kleiner Wege: Differentialkondensatoren





### Der Differentialkondensator

$$1/i\omega C \gg R \quad (3219)$$

Ausgehend von der Formel eines kapazitiven Spannungsteilers

$$U = U_s \cdot \frac{1/i\omega C_2}{1/i\omega C_1 + 1/i\omega C_2} \quad (3220)$$

oder mit Gleichung (3215)

$$U = U_s \cdot \frac{d_2/i\omega \epsilon_0 \cdot A}{d_1/i\omega \epsilon_0 A + d_2/i\omega \epsilon_0 \cdot A} \quad (3221)$$

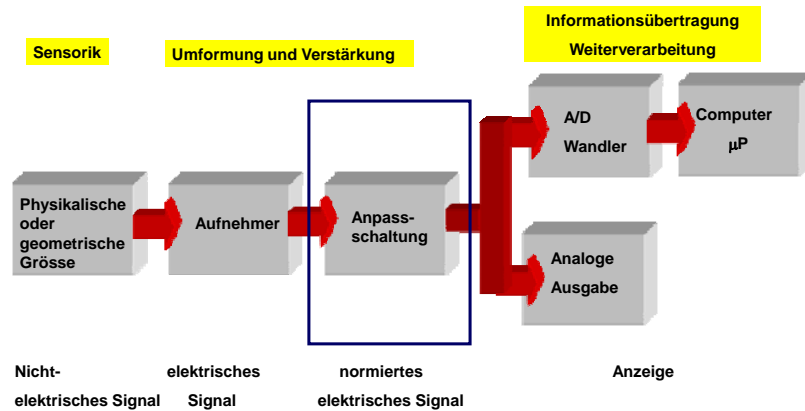
ergibt sich

$$U = U_s \cdot \left[ \frac{1}{2} + \frac{\Delta}{2d} \right] \quad (3222)$$

Aus Dissertation Ingensand

### Anpasssschaltungen

### Die Messkette



### Wheatstone

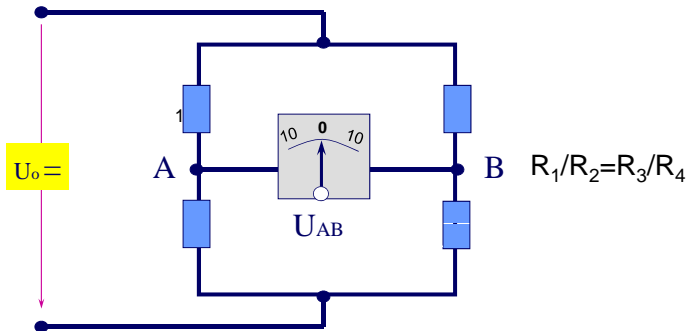


b. Feb. 6, 1802, Gloucester, Gloucestershire, Eng.  
d. Oct. 19, 1875, Paris

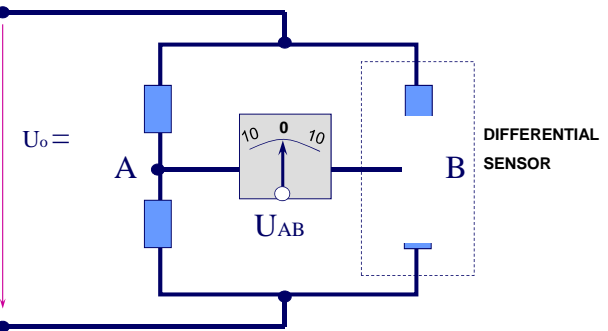
Wheatstone was appointed professor of experimental philosophy at King's College, London, in 1834, the same year that he used a revolving mirror in an experiment to measure the speed of electricity in a conductor. The same revolving mirror, by his suggestion, was later used in measurements of the speed of light. Three years later, with Sir William Fothergill Cooke of England, he patented an early telegraph. In 1843, he brought to notice the Wheatstone bridge, a device invented by British mathematician Samuel Christie.



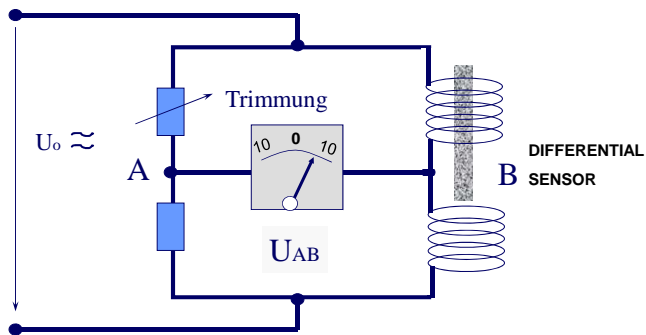
**Wheatstonebrücke**



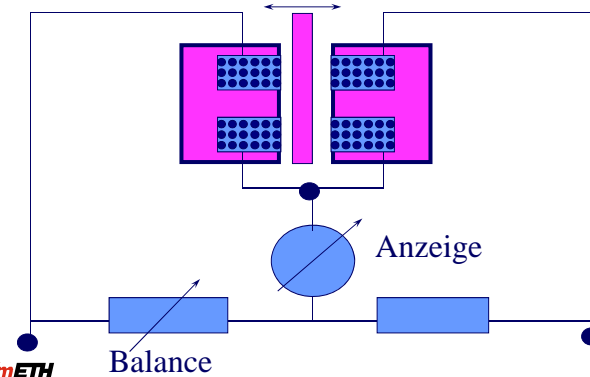
**Wheatstonebrücke**



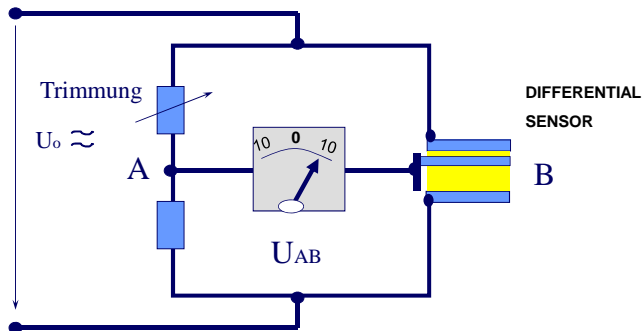
**Wheatstone Brücke im Wechselstromkreis**



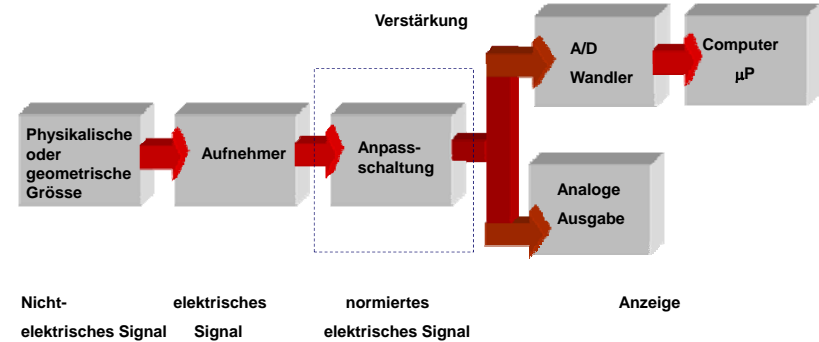
**Messung kleiner Wege: Induktive Weggeber (Queranker)**



### Wheatstone Brücke im Wechselstromkreis



### Die Messkette

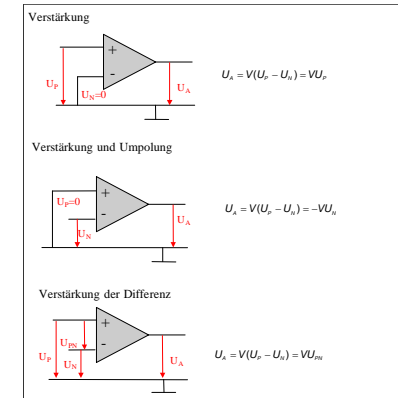
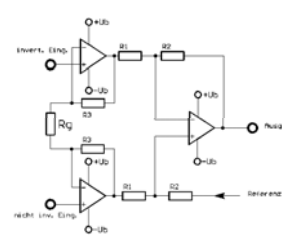


### Verstärker und Verstärkerschaltungen

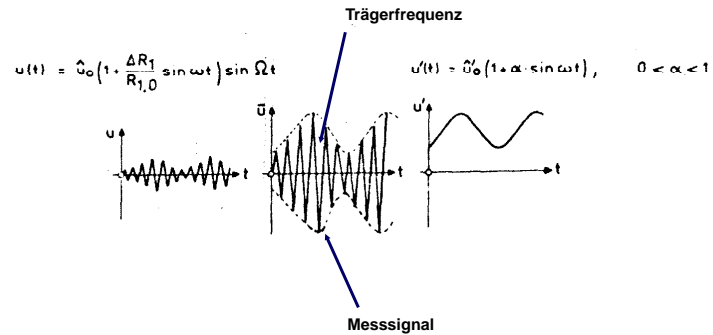
➤ Gleichspannungsverstärker

➤ Trägerfrequenzverstärker

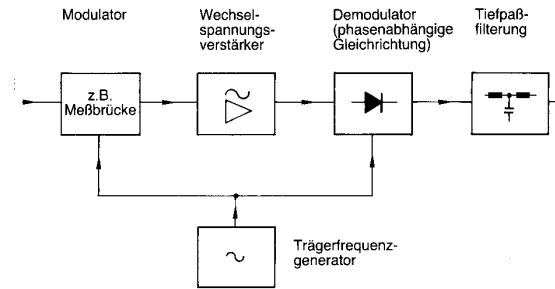
### Gleichspannungsverstärkung mit OP Verstärker



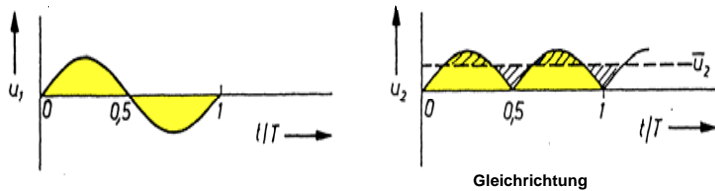
### Ausgangssignal einer Brückenschaltung



### Der Trägerfrequenz Verstärker



### Phasenempfindliche Demodulation



### Analog-Frequenzwandlung VCO'S

