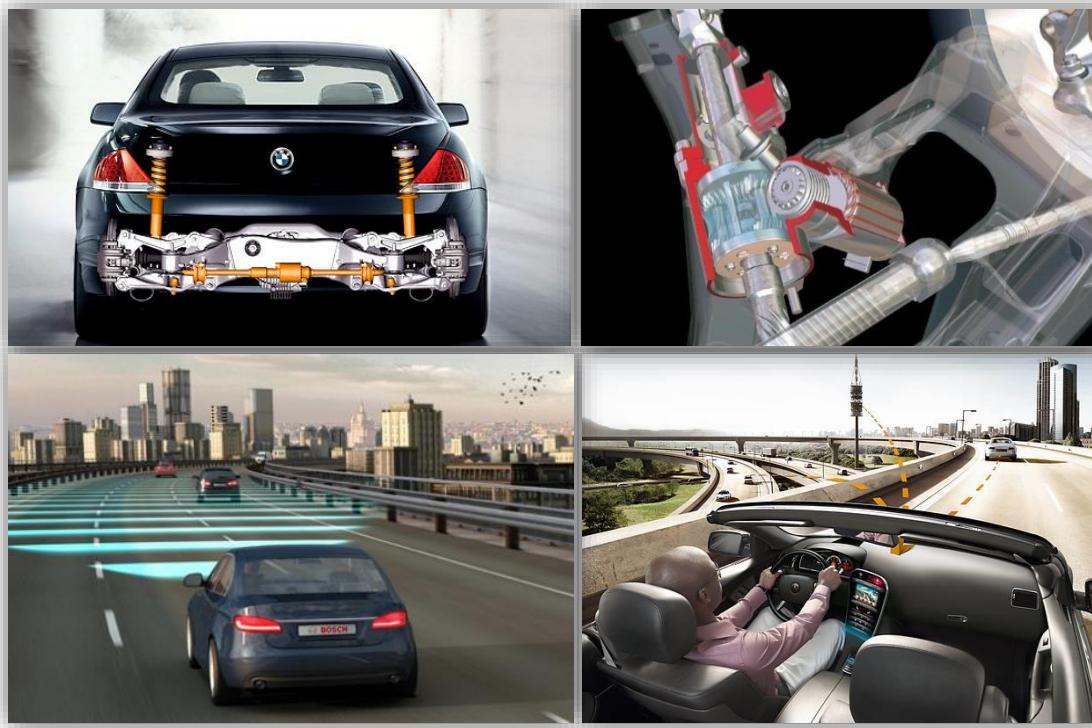


# Fahrzeugmechatronik I

## Sensoren



**Prof. Dr.-Ing. Steffen Müller  
M. Sc. Jochen Gallep et al.  
Fachgebiet Kraftfahrzeuge • Technische Universität Berlin**

# Wirkprinzip Übersicht (Auswahl)

Wirkprinzipien	$s, \varphi$	$v, \omega$	$a, \ddot{\omega}$	$F, M, p$
potentiometrisch	X			X
induktiv	X	X		X
kapazitiv	X		X	X
Ultraschall	X			
magnetisch	X	X		X
optisch	X	X		X
piezoelektrisch			X	X
piezoresistiv	X		X	X

Differentiation zur Bestimmung einer Messgröße wurde nicht berücksichtigt

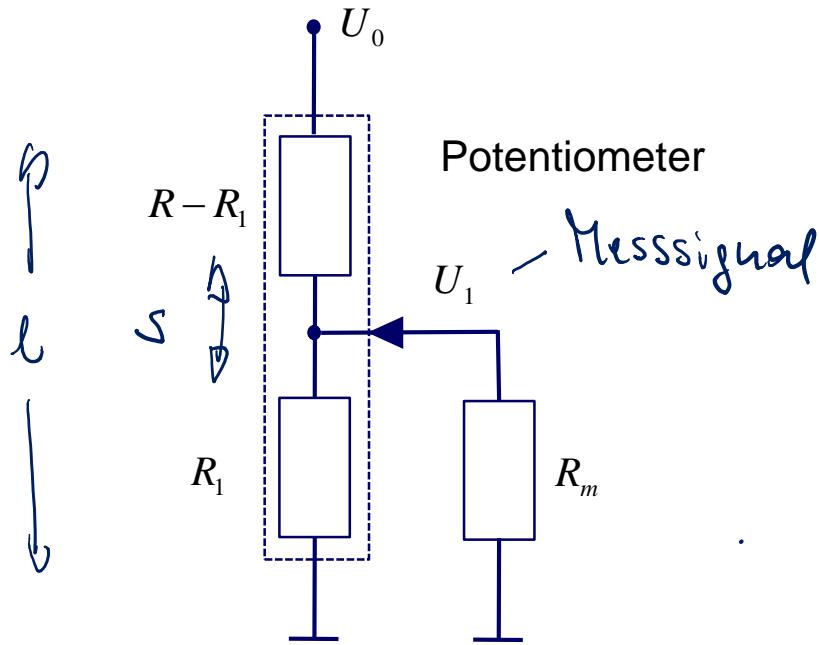
# Wirkprinzip Übersicht (Auswahl)

Wirkprinzipien	$s, \varphi$	$v, \omega$	$a, \ddot{\omega}$	$F, M, p$
potentiometrisch	X			X
induktiv	X	X		X
kapazitiv	X		X	X
Ultraschall	X			
magnetisch	X	X		X
optisch	X	X		X
piezoelektrisch			X	X
piezoresistiv	X		X	X

Differentiation zur Bestimmung einer Messgröße wurde nicht berücksichtigt

# Weg- und Winkelmessung

## Potentiometrische Verfahren



Naschungsgleichung

$$-U_0 + (R - R_1)I + (R_1 \parallel R_m)I = 0$$

Messsignal  $U_1 = f(s)$

mit  $(R_1 \parallel R_m) = \frac{R_1 R_m}{R_1 + R_m}$

Es folgt

$$U_1 = \frac{U_0 (R_1 \parallel R_m)}{(R - R_1) + (R_1 \parallel R_m)}$$

$R_m$  wird sehr groß ( $R_m \gg R_1$ ) gewählt. Dann

$$(R_1 \parallel R_m) \approx R_1$$

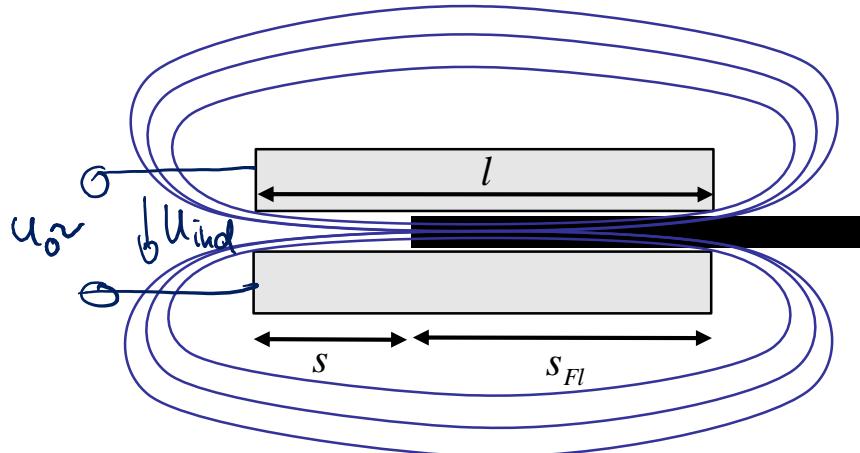
Somit

$$U_1 = U_0 \frac{R_1}{R} \xrightarrow{\text{s-abh.}} \left( R_1^s \right)$$

$R \sim \text{konst.}$

# Weg- und Winkelmessung

## Induktive Verfahren - Grundlagen



Für  $s=0$

$$\Phi = B n A = \frac{\mu_0 \mu_r \mu_n}{l} n A$$

Induktionsgesetz

$$U_{\text{ind}} = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{\mu_0 \mu_r \mu_n}{l} \frac{dA}{dt}$$

Somit

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r \mu_n l^2}{e} \quad (\text{Induktivität})$$

$$= \frac{l^2}{R_{\text{m}}} \quad \begin{array}{l} \text{magn. Widerstand} \\ \text{Reluktanz} \end{array}$$

$$R_{\text{m}} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A}$$

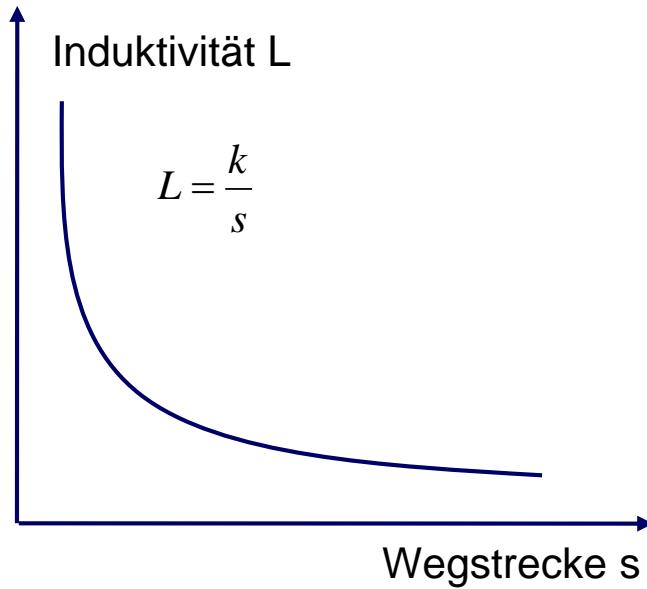
Für  $s \neq 0$  gilt

$$\approx 0, \text{ weil } \mu_r = 10^3 - 10^4 \quad A_q \gg A$$

$$R_{\text{m}} = \frac{s}{\mu_0 A} + \frac{s_{\text{Fl}}}{\mu_0 \mu_r A} + \frac{s_a}{\mu_0 A_q} \approx \frac{s}{\mu_0 A}$$

# Weg- und Winkelmessung

## Induktive Verfahren - Grundlagen

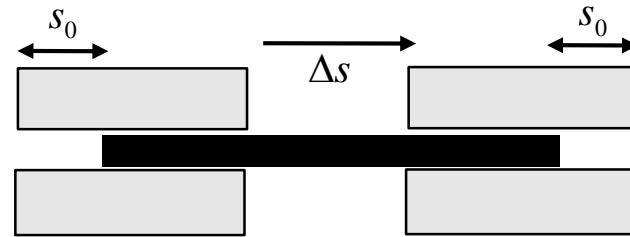


So mit

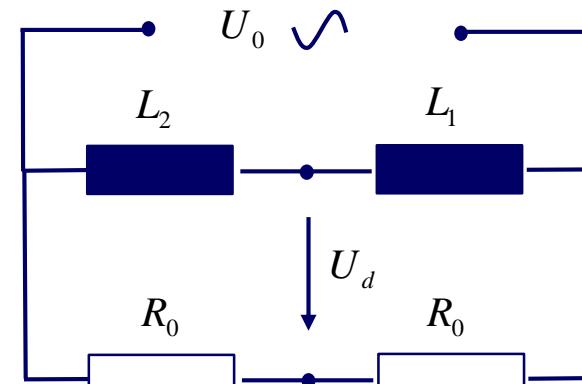
$$L = \frac{n^2 \mu_0 A}{s} = \frac{\varrho}{s}$$

Zupfindeindukt

$$\varepsilon = \frac{dL}{ds} = -\frac{\varrho}{s^2} = -\frac{L}{s}$$



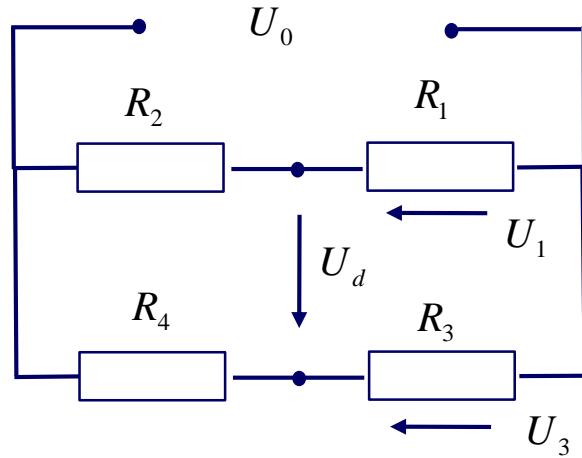
Differenzial-Tauchanker-Geber



Halbbrücke

# Weg- und Winkelmessung

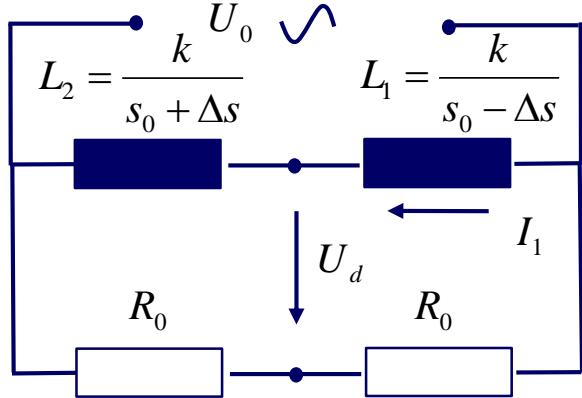
## Erinnerung: Weatstonesche Messbrücke



$$U_d = U_0 \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_3 + R_4)(R_1 + R_2)}$$

# Weg- und Winkelmessung

## Differenzial-Tauchanker-Geber (Halbbrücke)



$$\text{Mit } U_0(t) = \hat{U}_0 e^{i\omega t} \text{ ist}$$

$$\text{folgt } \hat{U}_1(t) = \hat{U}_1 e^{i\omega t}$$

$$\text{Somit } U_1(t) = L_1 \hat{J}_1 i\omega e^{i\omega t} \text{ ist}$$

$$U_2(t) = L_2 \hat{J}_2 i\omega e^{i\omega t}$$

Die Impedanzen der beiden Spulen

$$\hat{Z}_1 = i\omega L_1$$

$$\hat{Z}_2 = i\omega L_2$$

Analog zu Wheatstoneschen Brüche folgt dann

$$\begin{aligned} \hat{U}_d &= \hat{U}_0 \frac{i\omega L_2 R_0 - i\omega L_1 R_0}{i\omega (L_1 + L_2) + R_0} \\ &= \frac{\hat{U}_0}{2} \left[ \frac{1}{s_0 + \Delta s} - \frac{1}{s_0 - \Delta s} \right] \\ &\quad + \frac{\hat{U}_0}{2} \left[ \frac{1}{s_0 + \Delta s} + \frac{1}{s_0 - \Delta s} \right] = -\frac{\hat{U}_0}{2} \frac{4s}{s_0} \end{aligned}$$

# Weg- und Winkelmessung

## Kapazitive Verfahren

Der Messeffekt kapazitiver Wegsensoren ist die Änderung der Kapazität eines Plattenkondensators.

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}$$

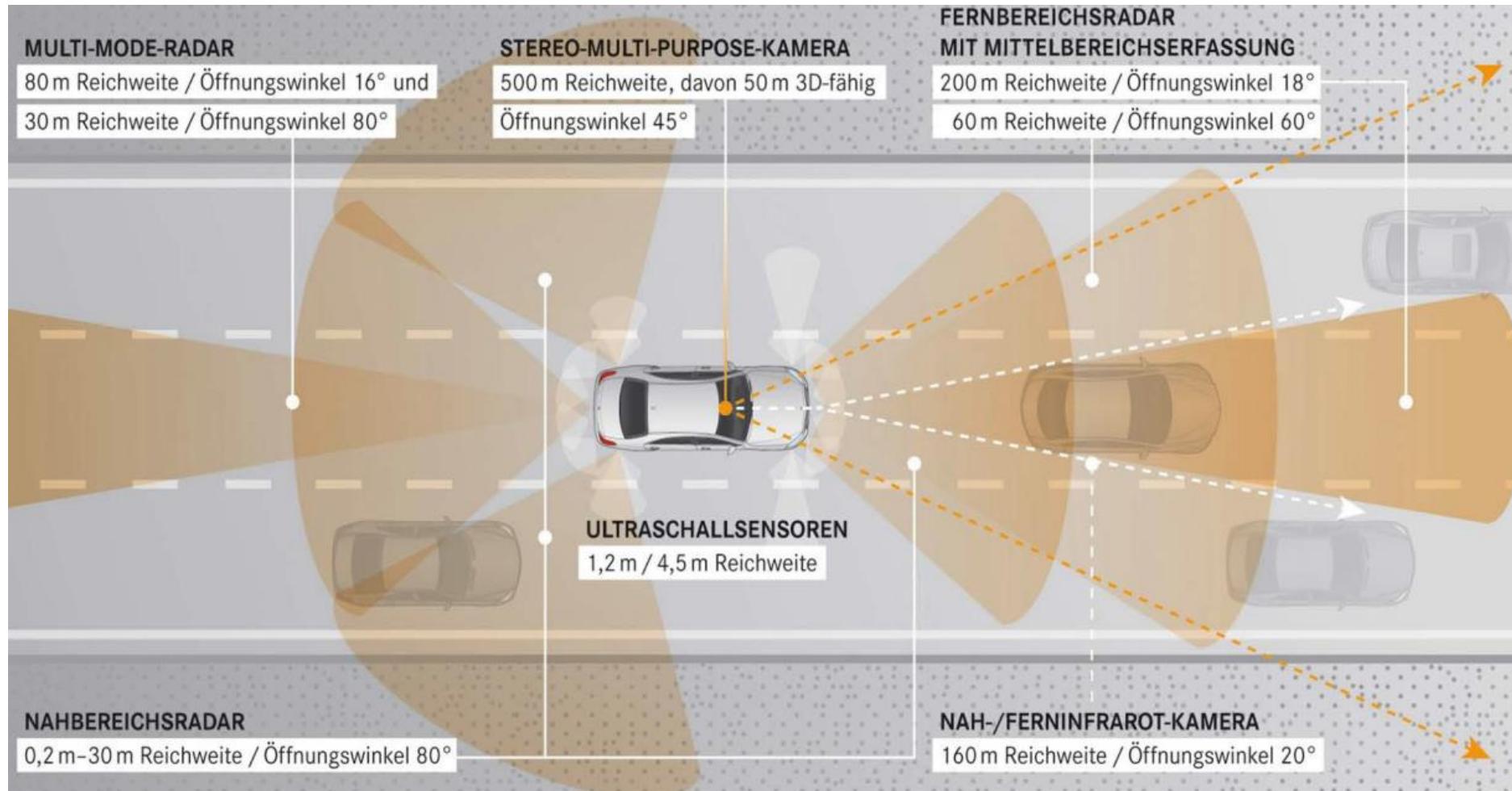
Aufbau, Auswertung und Anwendungsbereich sind ähnlich wie bei induktiven Wegsensoren.

# Weg- und Winkelmessung

## Kapazitive Verfahren - Konfigurationen

	Bewegung relativ	Einzelplatte		Mehrfachplatte Einzelkapazität
		Einzelkapazität	Differenzialsystem	
Änderung der Fläche A	LINEAR			
	DREHEND			
Änderung des Abstandes s	LINEAR			
	DREHEND			
Änderung der Permeabilität	LINEAR			

# Weg- und Winkelmessung Verfahren auf Ultraschallbasis



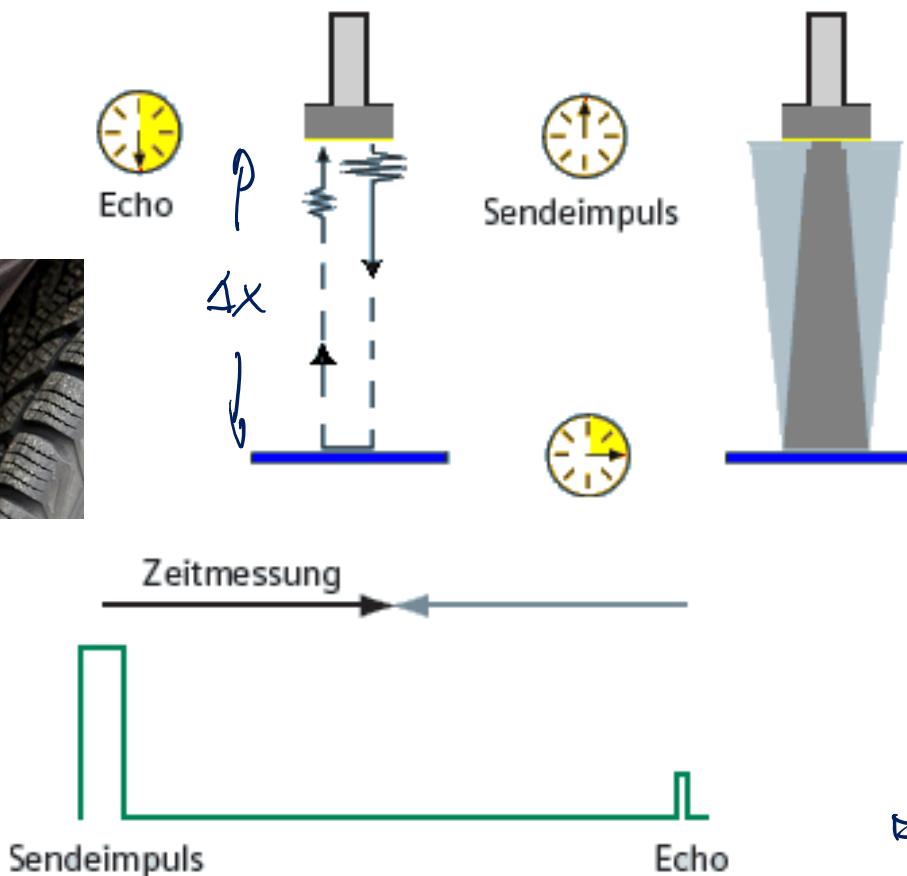
# Weg- und Winkelmessung

## Verfahren auf Ultraschallbasis

Hörbereich Mensch  
20 Hz - 20 kHz

$$16 \text{ kHz} - 1,6 \text{ GHz}$$

Messung der Zeit zwischen Ultraschallimpuls und Echoeingang



Ausbreitungsgeschwindigkeit  
(Schallgeschw.)

$$v_s = 343 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$(T=20^\circ\text{C}, p=1013 \text{ hPa})$$

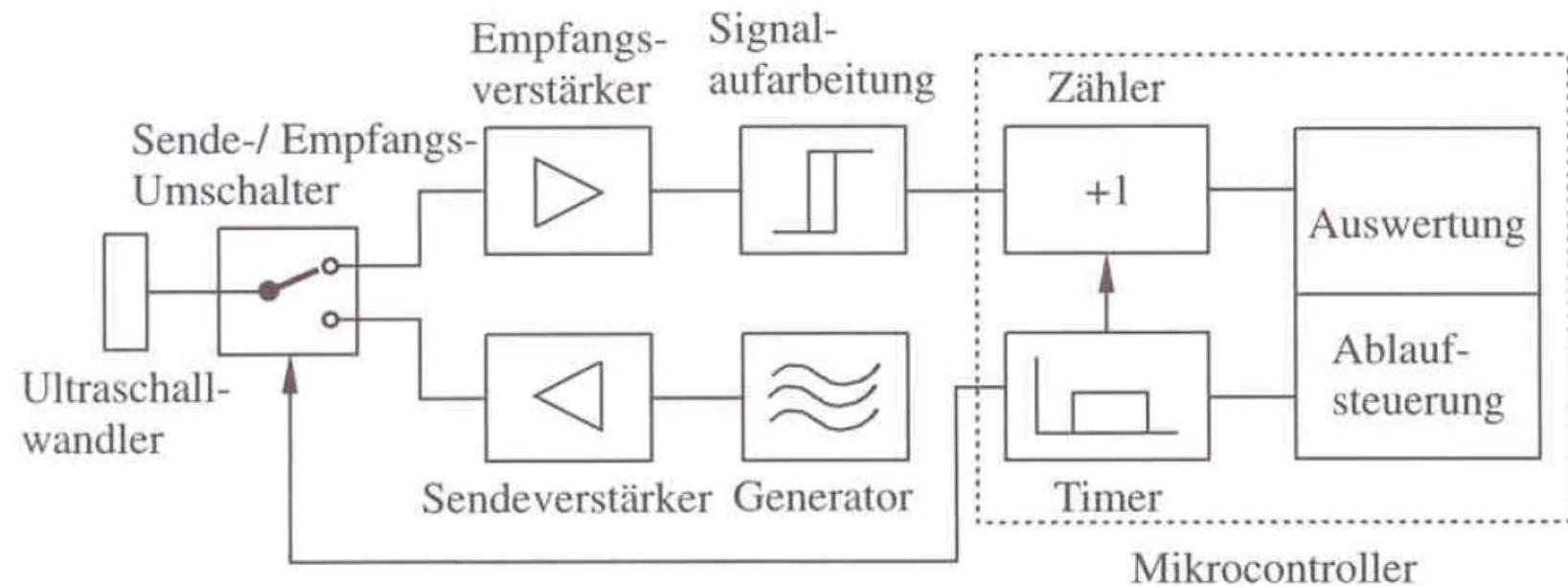
Für z.B. 1m Entfernung folgt

$$\frac{2d}{v_s} = \Delta t$$

$$\Leftrightarrow \Delta t = 5,8 \text{ ms}$$

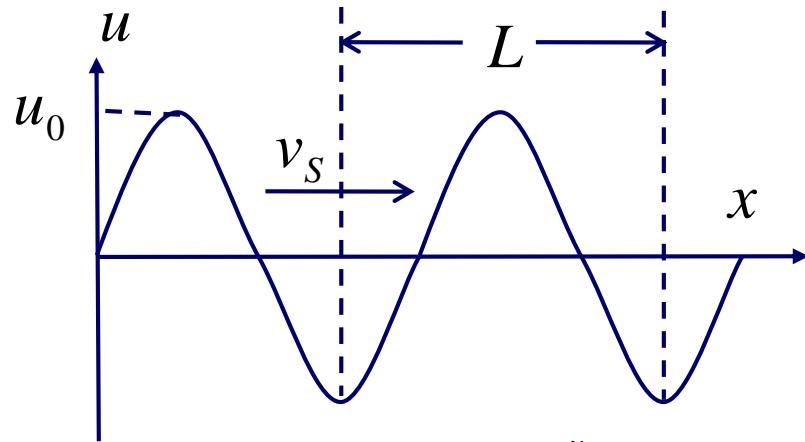
# Weg- und Winkelmessung

## Ultraschallsensor - Prinzipschaltbild



# Weg- und Winkelmessung

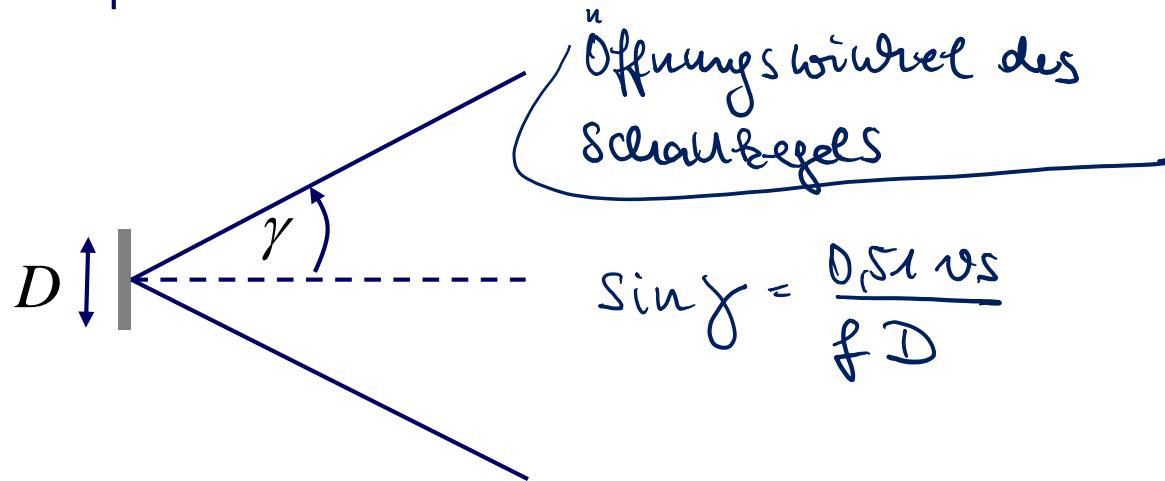
## Wellenlänge und Schallkegel



$$u(t) = u_0 \sin(2\pi f t)$$

mit  $f = \frac{v_s}{L}$  (zu)

$$L = \frac{v_s}{f}$$



- ▷ hohe Frequenzen  
filtern
- ▷ niedrige Frequenzen  
verringern Reibungsverluste  
(geeignet für längere Distanzen)

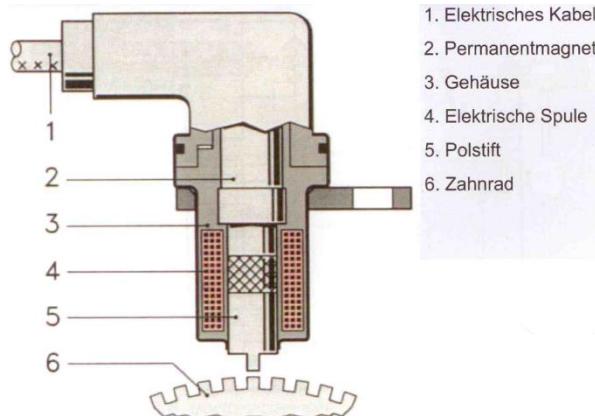
# Wirkprinzipien Übersicht (Auswahl)

Wirkprinzipien	$s, \varphi$	$v, \omega$	$a, \ddot{\omega}$	$F, M, p$
potentiometrisch	X			X
induktiv	X	X		X
kapazitiv	X		X	X
Ultraschall	X			
magnetisch	X	X		X
optisch	X	X		X
piezoelektrisch			X	X
piezoresistiv	X		X	X

Differentiation zur Bestimmung einer Messgröße wurde nicht berücksichtigt

# Geschwindigkeitsmessung

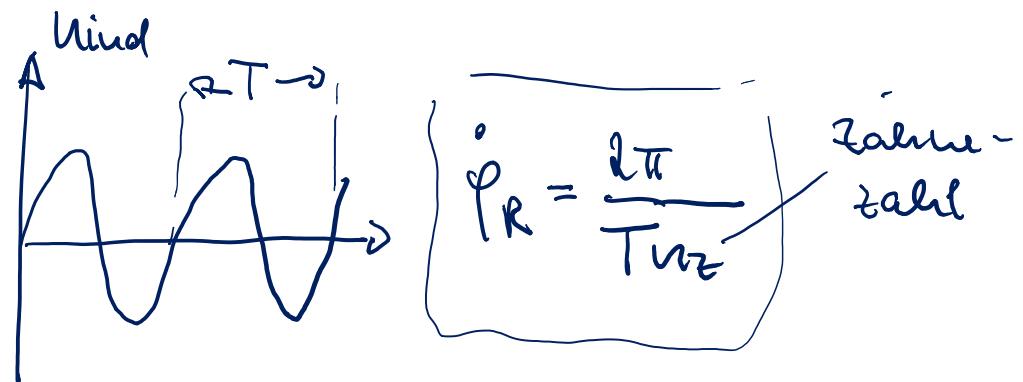
## Induktionsgeber



Durch die zeitliche Änderung des magn. Flusses wird in einer Spule Spannung induziert

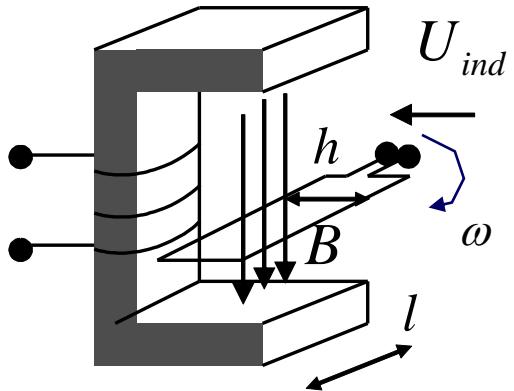
$$U_{\text{ind}} = \frac{d\Phi}{dt}$$

mit  $\Phi = nBA$  Änderung d.  
magn. Flussdichte



# Geschwindigkeitsmessung

## Tachogenerator



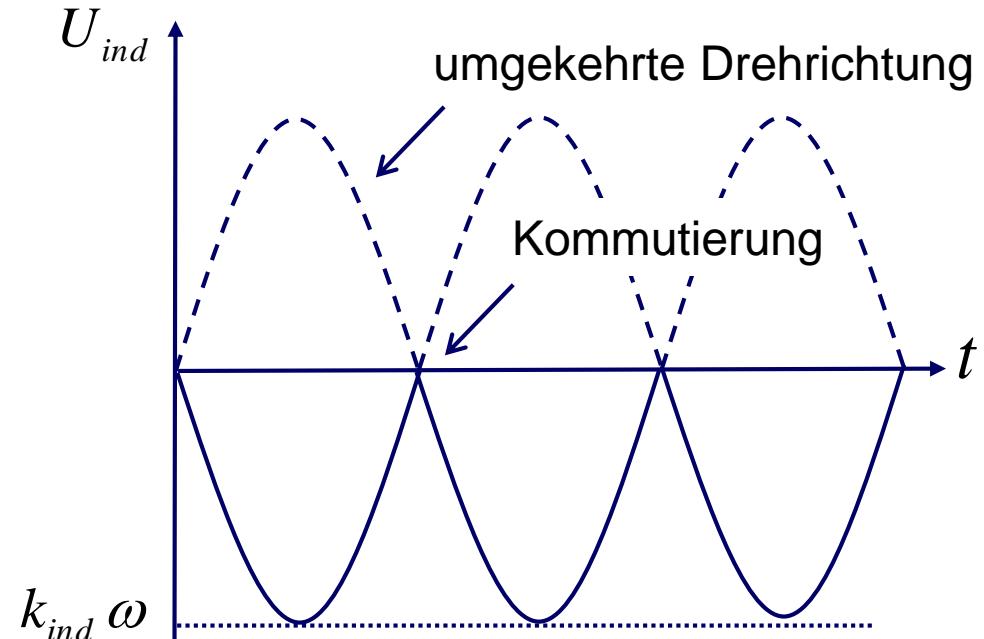
Induktionsgesch

$$U_{ind} = \frac{d\Phi}{dt} = nB \frac{dA}{dt}$$

$$= nB l h \frac{d}{dt} \cos \omega t$$

$$= -nB l h \sin \omega t \quad \omega$$

$k_{ind}$



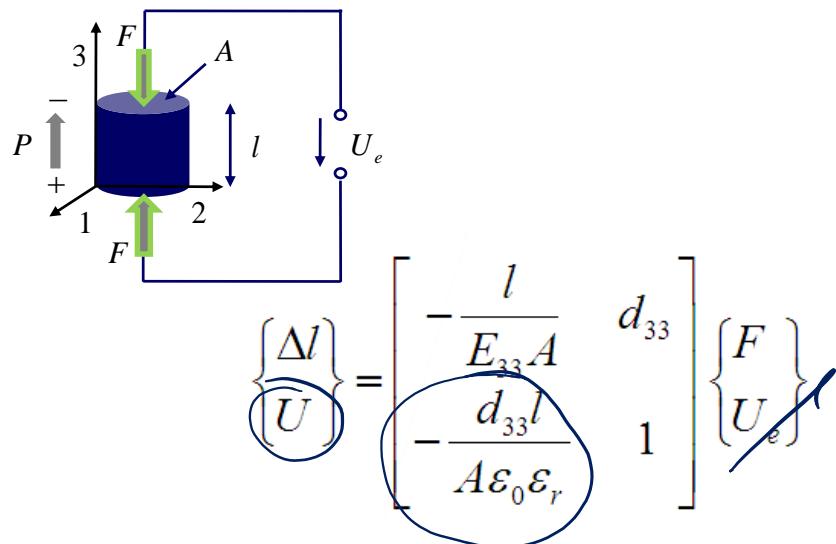
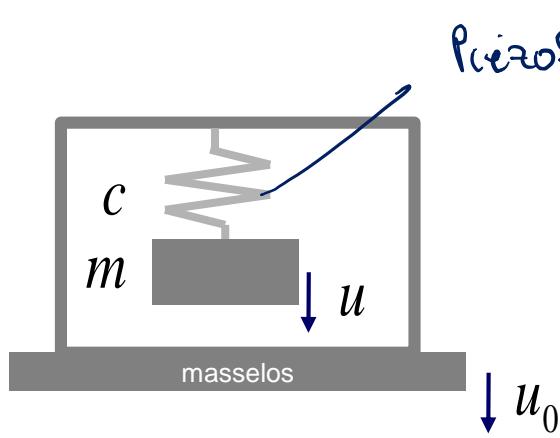
# Wirkprinzipien Übersicht (Auswahl)

Wirkprinzipien	$s, \varphi$	$v, \omega$	$a, \ddot{\omega}$	$F, M, p$
potentiometrisch	X			X
induktiv	X	X		X
kapazitiv	X		X	X
Ultraschall	X			
magnetisch	X	X		X
optisch	X	X		X
piezoelektrisch			X	X
piezoresistiv	X		X	X

Differentiation zur Bestimmung einer Messgröße wurde nicht berücksichtigt

# Beschleunigungsmessung

## Piezoelektrisches Verfahren



Piezoverfahren Es gilt

$$\ddot{u} = -c(u - u_0)$$

Sofor  $\omega = \sqrt{\frac{c}{m}} \gg \zeta$  gilt

$$\ddot{u} \approx \ddot{u}_0 = -c(u - u_0) = F_{\text{Piezo}}$$

Weiterhin gilt

$$U = \frac{-d_{33} \ell}{A \epsilon_0 \epsilon_r}$$

$$F_{\text{Piezo}} = \frac{-d_{33} \ell u_0}{A \epsilon_0 \epsilon_r}$$

Empfindlichkeit

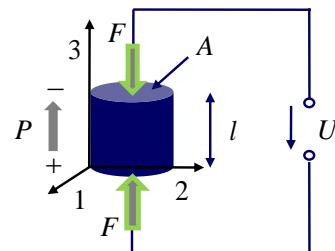
# Wirkprinzipien Übersicht (Auswahl)

Wirkprinzipien	$s, \varphi$	$v, \omega$	$a, \ddot{\omega}$	$F, M, p$
potentiometrisch	X			X
induktiv	X	X		X
kapazitiv	X		X	X
Ultraschall	X			
magnetisch	X	X		X
optisch	X	X		X
piezoelektrisch			X	X
piezoresistiv	X		X	X

Differentiation zur Bestimmung einer Messgröße wurde nicht berücksichtigt

# Kraft- und Momentenmessung

## Piezoelektrisches Verfahren



$$\begin{Bmatrix} \Delta l \\ U \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{l}{E_{33}A} & d_{33} \\ -\frac{d_{33}l}{A\varepsilon_0\varepsilon_r} & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F \\ U_e \end{Bmatrix}$$

Sonderfall 1: Piezo frei,  $U_e \neq 0$

$$\Delta l = d_{33} U_e$$

Sonderfall 2: Piezo eingespannt,  $U_e \neq 0$

$$F = + \frac{d_{33} E_{33} A}{l} U_e$$

Sonderfall 3: Druckbelastung,  $U_e = 0$

$$U = - \frac{d_{33} l}{A \varepsilon_0 \varepsilon_r} F$$

Typische Materialwerte und Abmessungen  
(PZT Keramik PXE 52)

$$\varepsilon_0 \varepsilon_r = 3 \cdot 10^{-8} \frac{As}{Vm}$$

$$l = 2 \cdot 10^{-2} m$$

$$E_{33} = 50 \cdot 10^9 \frac{N}{m^2}$$

$$A = 1 \cdot 10^{-4} m^2$$

$$d_{33} = 580 \cdot 10^{-12} \frac{As}{N}$$

Sonderfall 1:

$$50 \mu m = 580 \cdot 10^{-12} \frac{As}{N} \cdot 86 kV$$

Sonderfall 2:

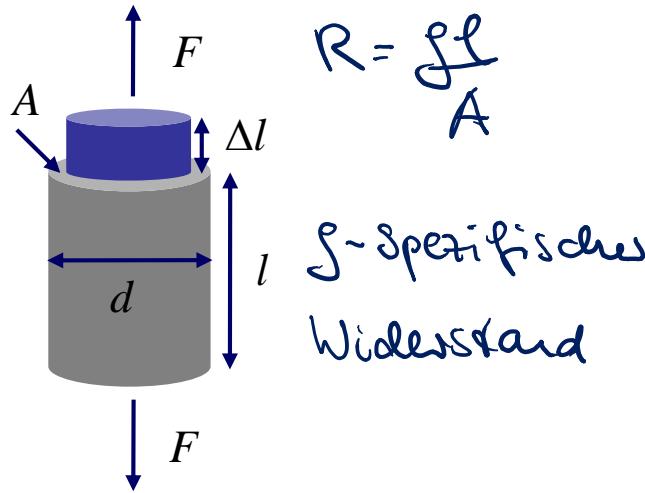
$$100 N = 0.145 \frac{As}{m} \cdot 690 V$$

Sonderfall 3 (Sensorfunktion):

$$3.9 V = 3.9 \frac{V}{N} \cdot 1 N$$

# Kraft- und Momentenmessung

## Messverfahren mit Dehnungsmessstreifen



Bei einer Längenänderung frei  
(im Sinne eines totalen Differentials)

$$\Delta R_E = \frac{l}{A} \Delta f + \frac{f}{A} \Delta l - \cancel{\frac{f l}{A^2} \Delta A} \quad \frac{\cancel{f l}}{\cancel{A^2}} \frac{\Delta d}{d}$$

mit

$$\frac{\Delta A}{\Delta d} = \frac{\partial A}{\partial d} = \frac{\partial}{\partial d} \left( \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2 \right) = \frac{\pi}{4} 2d \frac{d}{d} = 2A \frac{1}{d}$$

Dann

$$\frac{\Delta R_E}{R} = \cancel{\frac{\Delta f}{f}} + \frac{\Delta l}{l} - 2 \cancel{\frac{\Delta d}{d}} \quad \left| \frac{1}{\Delta l / l} \right.$$

bzw.

$$\frac{\Delta R_E / R}{\Delta l / l} = \underbrace{1 - 2 \cancel{\frac{\Delta l}{l}}}_k \quad \begin{array}{l} \text{Querelastizitäts-} \\ \text{zahl (0,2-0,5)} \\ \text{metall} \end{array}$$

Somit

$$k = \frac{\Delta d / d}{\Delta l / l}$$

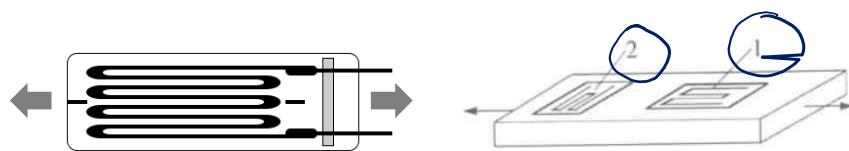
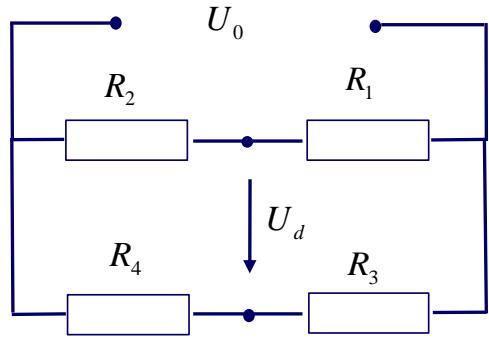
$$\frac{\Delta R_E}{R} = k \cdot \epsilon = k E \sigma_{xx} \quad \text{bzw}$$

$$\Delta R_E = \underbrace{\frac{k E}{A} R}_{\text{Abw}} F$$

R ist T-abh.

# Kraft- und Momentenmessung

## Messverfahren mit Dehnungsmessstreifen



$$U_d = U_0 \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_3 + R_4)(R_1 + R_2)}$$

Halbbrücke

$$R_3 = R_4 = R_0$$

$$R_1 = R_0 + \Delta R_E + \Delta R_T$$

$$R_2 = R_0 + \cancel{\Delta R_E}_0 + \Delta R_T$$

Somit (einsetzen) ergibt sich

$$\boxed{U_d = \frac{U_0}{4} \frac{\Delta R_E}{R_0}}$$

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**