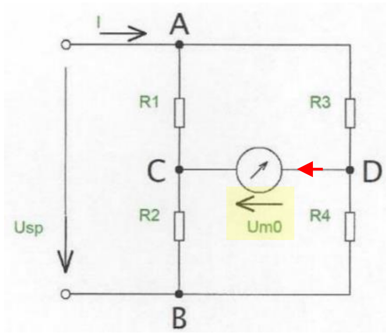
Brückenschaltung: *Ersatz-Innenwiderstand allgemein: $R_i = R_{cd} = R_1 \parallel R_2 + R_3 \parallel R_4$

Kompensationsverfahren: $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \rightarrow U_{m_0} = 0 \;\; bzw. \;\; U_{R2} = U_{R4}$

Ausschlagverfahren: Stromfluss auf Brücke beachten

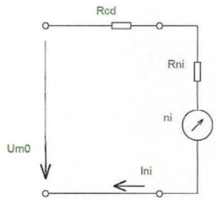
Leerlaufspannung: $U_{m_0} = U_{SP} \cdot \frac{R_1 \cdot R_4 - R_2 \cdot R_3}{(R_1+R_2)\cdot(R_3+R_4)}$ (vielleicht auch mit ESQ* arbeiten)



Empfindlichkeit: $S = \frac{\gamma}{\Delta R_2} = \frac{U_{m0}}{R_{cd}+R_{ni}} \cdot \frac{1}{\kappa_I} \cdot \frac{1}{\Delta R}$

Brückenstrom: $I_{ni} = \frac{U_{m0}}{R_{cd}+R_{ni}} = \gamma \cdot \kappa_I$

γ = Skalenteilen κ_I = Skalenkonstanen



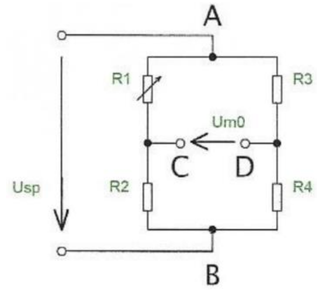
Viertelbrücke: 1 Widerstand ändert sich, $R = R_2 = R_3 = R_4$ $R_1 = R + \Delta R$

Leerlaufspannung: $U_{m_0} = U_{SP} \cdot \frac{\Delta R}{4R} \cdot \frac{1}{1+\frac{\Delta R}{2R}}$

Ersatz-Innenwiderstand: $R_{cd} = R \cdot \left(\frac{R+\Delta R}{2R+\Delta R} + \frac{1}{2}\right)$

Brückenstrom ist nicht linear zu ΔR: *für $\frac{\Delta R}{R} \ll 1$ *Ersatzinnenwiderstand: $R_{cd} \approx R$

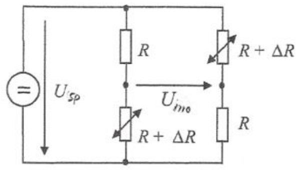
*Leerlaufspannung: $U_{m0} = U_{SP} \cdot \frac{\Delta R}{4R}$ *Brückenstrom: $I_G = I_{ni} \approx U_{SP} \cdot \frac{\Delta R}{4R} \cdot \frac{1}{R+R_{ni}}$



Halbbrücke: 2 Widerstände ändern sich, doppelte Empfindlichkeit als Viertelbrücke

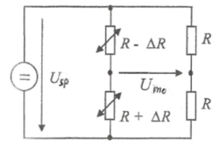
gleichsinnige Veränderung von R_2 und R_3: $R_2 = R + \Delta R$ $R_3 = R + \Delta R$ $R_1 = R_4 = R$

Leerlaufspannung: $U_{m_0} = U_{SP} \cdot \frac{2R\cdot\Delta R+\Delta R^2}{(2R+\Delta R)^2}$ für kleine $\frac{\Delta R}{R}$: $U_{m0} = U_{SP} \cdot \frac{\Delta R}{2R}$



Gegensinnige Veränderung von R_1 und R_2: $R_1 = R - \Delta R$ $R_2 = R + \Delta R$ $R_3 = R_4 = R$

Leerlaufspannung: $U_{m_0} = U_{SP} \cdot \frac{2\Delta R\cdot R}{4R^2}$ auch für größere $\frac{\Delta R}{R}$: $U_{m0} = U_{SP} \cdot \frac{\Delta R}{2R}$

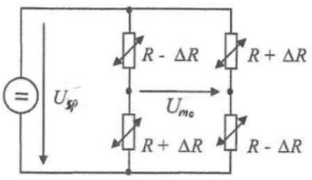


Ersatz-Innenwiderstand: $R_{cd} = R \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2\right]$

Vollbrücke: alle 4 Widerstände sind variabel,

Leerlaufspannung: $U_{m0} = U_{sp} \cdot \frac{\Delta R}{R}$

Ersatz-Innenwiderstand: $R_{CD} = R_i = R - \frac{(\Delta R)^2}{R}$



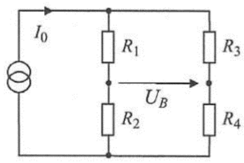
$R_2 = R + \Delta R$, $R_3 = R + \Delta R$,

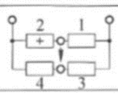
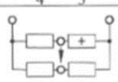
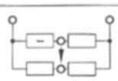
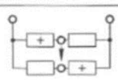
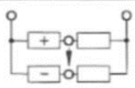
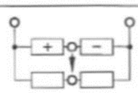
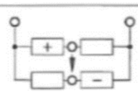
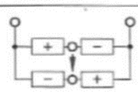
$R_1 = R - \Delta R$, $R_2 = R - \Delta R$

Stromspeisung

Brückenspannung: $U_{B0} = I_0 \cdot \frac{R_2 \cdot R_3 - R_1 \cdot R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}$ Diagonalstrom mit R_{ni}: $I_{ni} = \frac{U_{B0}}{R_i + R_{ni}}$

Innenwiderstand: $R_i = (R_2 + R_4) \parallel (R_1 + R_3)$



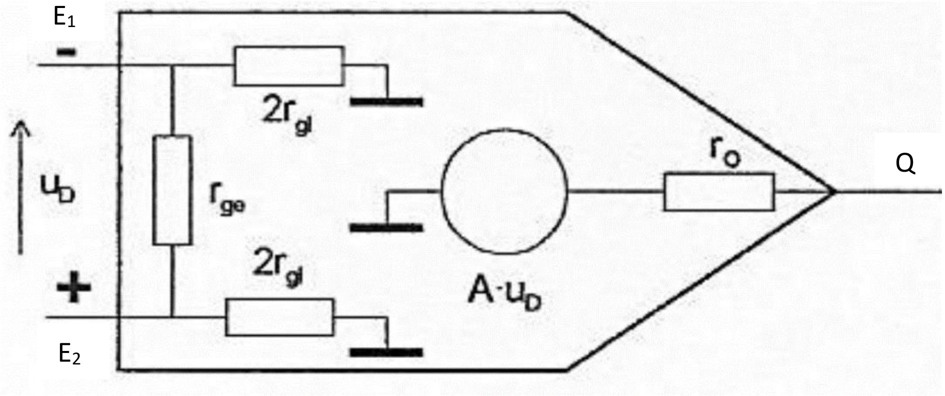
		U_0-gespeist	I_0-gespeist
a		$U_d \approx + \frac{U_0}{4}\frac{\Delta R}{R_0}$	$U_d \sim \frac{I_0}{4}\Delta R$
b		$U_d \approx - \frac{U_0}{4}\frac{\Delta R}{R_0}$	$U_d \sim - \frac{I_0}{4}\Delta R$
c		$U_d \approx - \frac{U_0}{4}\frac{\Delta R}{R_0}$	$U_d \sim - \frac{I_0}{4}\Delta R$
d		$U_d \approx \frac{U_0}{2}\frac{\Delta R}{R_0}$	$U_d = \frac{I_0}{2}\Delta R$
e		$U_d \approx \frac{U_0}{2}\frac{\Delta R}{R_0}$	$U_d = \frac{I_0}{2}\Delta R$
f		$U_d = \frac{U_0}{2}\frac{\Delta R}{R_0}$	$U_d = \frac{I_0}{2}\Delta R$
g		$U_d \approx - \frac{U_0}{4}\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)^2$	$U_d = - \frac{I_0}{4}\frac{\Delta R}{R_0}\Delta R$
h		$U_d = U_0 \frac{\Delta R}{R_0}$	$U_d = I_0 \Delta R$

Oszilloskop:

Frequenz: $f = \frac{1}{T}$ Phasenverschiebung: $\varphi = \frac{\Delta t \cdot 360°}{T}$ Spitzen-Spitzen-Spannung: $U_{ss} = div \cdot \frac{V}{div}$

Messverstärker:

Operationsverstärker:



r_{ge} = Gegentakteingangswiderstand

r_{gl} = Gleichtakteigangswiderstand

r_O = Ausgangswiderstand

GWP = Verstärkungs-Bandbreiteprodukt

A_0 = DC-Leerlaufverstärkung

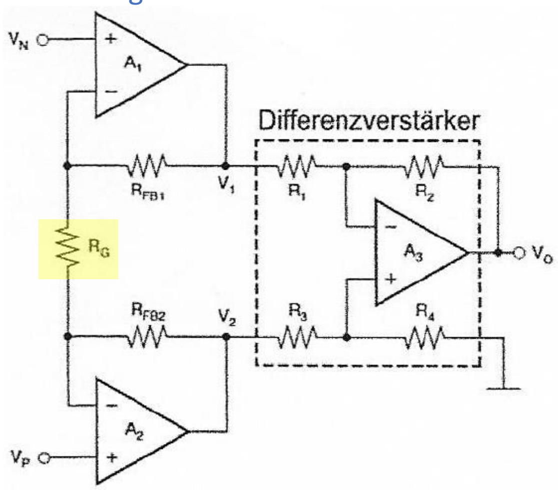
A_{GL} = Gleichtaktverstärkung

Gleichtackteingangsspannung U_{GL} wenn $U_{E1} = U_{E2}$ $U_A = A_{GL} \cdot U_{GL}$ Mittelwert zwischen E im Bezug auf Masse

Gleichtaktunterdrückung: $CMRR = \frac{A_D\ (erwünscht)}{A_{GL}\ (unerwünscht)}$ → Gütekriterium

Eingangs-Offset-Spannung: U_{I0} ist die Spannung U_{ID} bei der $U_Q = 0$

Differenzverstärkerschaltung: bessere Methode zum Diskret Aufgebauten Differenzverstärker



Verstärkung: $\boxed{G_{DIFF} = \frac{R_{FB1} + R_{FB2} + R_G}{R_G}}$

Mit $R_{FB1} = R_{FB2}$ Verstärkung: $\boxed{G_{DIFF} = 1 + \frac{2R_{FB}}{R_G}}$

Vorteile:

Verstärkung hängt nur von R_G ab

Gleichtaktverstärkung der Vorstufen fast Null

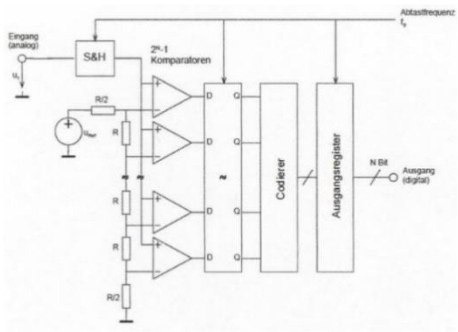
Analog-Digital-Wandlung:

Quantisierungsstufe: $\boxed{x_{min} = Q = \frac{x_{max}}{(2^{-N} - 1)}}$ mit: x = Amplitude und N = Bitbreite

Von kürzerer nach längerer Umsetzzeit geordnet:

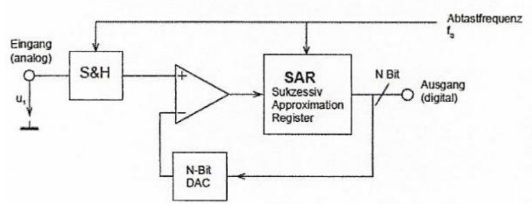
Parallelverfahren → Wägeverfahren → Zählverfahren → Sigma-delta-Verfahren

Parallelverfahren (Flash-AD-Wandler)



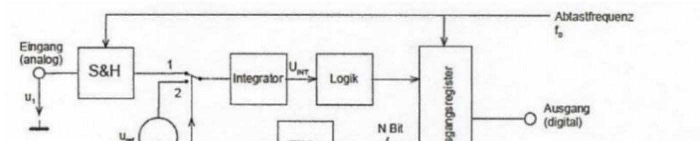
- 1 Wort pro Zyklus
- Jeder Ausgangswert ein eigener Komparator
- Sehr schnell aber in Auflösung beschränkt
- Ein n-Bit Wandler braucht (2^n-1) Komparatoren
- Abtastrate 1 GHz und 8-12 Bitbreite

Sukzessive Approximation (SAR-AD-Wandler)



- 1 Pegel pro Zyklus
- Datenbreite N-Bit wandeln die Eingangsspannung in N-Zyklen um

Zählverfahren



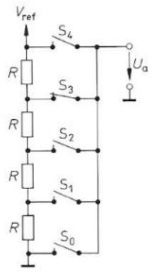
$\boxed{\frac{U_{1S}}{U_{Ref}} = \frac{t_2}{t_1}}$

- 1 Digit pro Zyklus
- Geringer Schaltungsaufwand, aber langsam
- Meistens Dual-Slope

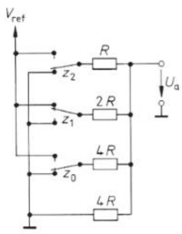
Delta-Sigma Wandler (ΔΣ-Wandler)

- Überabtastverfahren (braucht längere Umsetzzeit)
- Auflösung 20-24 Bit Eingangssignale bis 100kHz

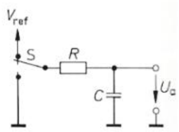
Digital-Analog-Wandlung:



Parallelverfahren



Wägeverfahren



Zählverfahren

Beim Parallelverfahren werden mit einem Spannungsteiler alle möglichen Spannungswerte bereitgetellt. Mit einem 1 aus n-Dekoder wird dann derjenige Schalter geschlossen, dem die gewünschte Ausgangsspannung zugeordnet ist.

Beim Wägeverfahren ist jedem Bit ein Schalter zugeordnet. Über entsprechend gewichtete Widerstände wird dann die Ausgangsspannung aufsummiert.

Das Zählverfahren erfordert nur einen einzigen Schalter, der periodisch geschlossen und wieder geöffnet wird. Das Tastverhältnis wird mittels Pulsbreitenmodulator so eingestellt, dass der arithmetische Mittelwert der Ausgangsspannung der digitalen Eingangsinformation entspricht.

Messung nicht elektrischer Größen:

Zeit und Frequenzmessung:

Messung von Zeitintervalle:

Zeitintervallmessung: $T_x = \frac{N_x}{f_R}$ $\qquad N_x = Zählerstand; \quad f_R = Taktfrequenz$

Auflösung des Zeitintervalls: $\Delta T_x = \frac{1}{f_R}$

Messunsicherheit: $\frac{u_{T_x}}{T_x} = \frac{1}{N_x} + \left|\frac{\Delta f_R}{f_R}\right|$ und somit Messabweichung: $\mp \frac{1}{N_x} + \left|\frac{\Delta f_R}{f_R}\right|$

Messung der Periodendauer:

Periodendauer: $T = \frac{N_x}{f_R}$ Messunsicherheit von T: $\frac{u_T}{T} = \frac{1}{N_x} + \frac{u f_R}{f_R}$

Digitale Frequenzmessung:

Frequenz: $f_x = \frac{N_x}{T}$

Positions- und Winkelmessung:

Lineare Wegmesssysteme: Erfassen von Positionen und Messen von Abständen

Rotative Wegmesssysteme: Regel Drehgeber, Encoder oder Potentiometer

Absolute Wegmessung: der Positionswert steht direkt nach dem Einschalten zur Verfügung

Inkrementalen Wegmessung: muss nach dem Einschalten zuerst ein Referenzpunkt anfahren, um Null-Position zu erhalten (Vorteil: eine höhere Wegauflösung, Nachteil: Crash am Anfang fahren)

(Liefern nur ein A,B-Signal (Quadratursignal) und können somit nur relative Wegstrecken zählen)

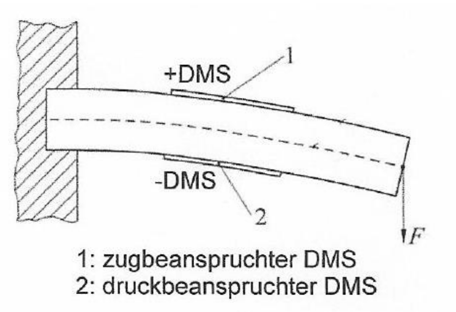
Dehnungsmesssteifen:

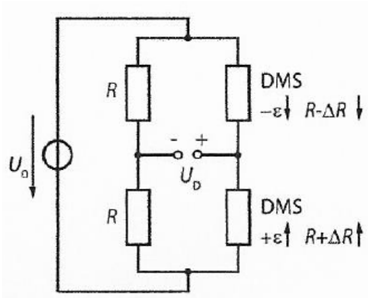
$$\frac{\Delta R}{R} = \left(\frac{\frac{\Delta\rho}{\rho}}{\varepsilon} + 1 + 2\mu \right) \cdot \varepsilon = k \cdot \varepsilon \qquad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

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

Dehnen → Widerstand vergrößern

Stauchen → Widerstand verkleinern





Brückenspannung:

$$U_D = U_{Br} = \frac{U_0}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R} = \frac{U_0}{2} \cdot k \cdot \varepsilon$$

Temperaturmessung:

Überblick Berührende:
Widerstands-Temperaturfühler (
Thermoelement-Temperaturfühler (hohe Temperaturen messbar
Halbleiter-Sensoren (integrierte Schaltkreise, Temperatur 40 bis 150 Grad)

Metall-Widerstandsthermometer:

(PTWert Wert = R_0 bei 0 Grad Celsius)

Widerstand bei veränderter Temperatur: $\boxed{R(T) = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta T + \beta \cdot (\Delta T)^2)}$

Mit R_0 = Grundwiderstand bei T_0 und ΔT = Temperaturveränderung

Bei Linearisiertem Temperaturverlauf: $\boxed{R(\vartheta) = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta)}$ Formel ohne beta (oder 0 … 100 Grad)

Empfindlichkeit des Fühlers: $\boxed{E = \frac{dR}{d\vartheta} = R_0 \cdot \alpha}$ „wie ändert sich Widerstand aufgrund Temperaturänderung“

Pt1000 ist empfindlicher wie Pt 100

Temperaturkoeffizient α: $\boxed{\alpha = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{dR}{d\vartheta} \quad \text{in der Einheit:} \quad \left[\frac{1}{K}\right]}$

Umgestellt gemessene Temperatur: $T = \frac{(R - R_{stör}) - R_0}{R_0 \cdot \alpha}$ mit $R_{stör}$ = Messleitungswiderstand

Zulässiger Strom:

$$I_{zul} = \sqrt{\frac{E_K \cdot \Delta T_{zul}}{R_0}}$$

mit:

I_{zul}: zulässiger Messstrom

E_K: Eigenerwärmungskoeffizient in W/K

ΔT_{zul}: zulässige Temperaturerhöhung

R_0: Nennwiderstand

$P = I^2 R$

Verständnisfragen:

AD-Wandler-Kenngrößen:

Auflösung: Sie besagt, welche Wortbreite *N* in Bits zur Umsetzung verwendet wird. Daraus folgt die Wandlungsgenauigkeit (Resolution) der AD-Wandlung. (Quantisierungsstufe-Formel oben).

Wandlungszeit: Sie beschreibt die minimal notwendige Zeit, die der Wandler zur Umsetzung benötigt.

Abtast-Halteschaltung: (**Sample&Hold-Schaltung**) Sie hält als Analogspeicher die Eingangsspannung während der Dauer der Wandlung konstant. Das Abtastintervall TA wird dabei in eine Abtastzeit t_{ST} und eine Haltezeit t_H unterteilt. In der Abtastzeit t_{ST} wird das Eingangssignal erfasst und gespeichert. In der folgenden Haltezeit t_H erfolgt die Wandlung der konstanten Spannung in ein binäres Wort.

Apertur-Verzögerung: Zeitspanne zwischen dem Anlegen des Haltemodus und dem tatsächlichen Übergang in den Haltemodus.

Apertur-Jitter: Variation der Aperturverzögerung. Der Apertur-Jitter beschränkt die nutzbare Bandbreite des abzutastenden Signals, weil der Einfluss zu einer Verschlechterung des Signal-Rauschabstandes bei höheren Frequenzen führt.

Offset- und Verstärkungsfehler: Offsetfehler äußern sich in einer seitlichen Verschiebung der Umsetzkennlinie. Verstärkungsfehler in einer Abweichung der idealen Steigung. Meist erfolgt eine schaltungstechnische Kompensation.

Monotonie: Bei gleichmäßig steigender Eingangsspannung wird eine gleichmäßig steigende Ausgangs-spannung in Quantisierungsschritten erwartet. Bei Monotoniefehler treten gewisse Aus-gangscodes nicht auf (Missing Codes).

Integrale Nichtlinearität (INL): Sie beschreibt den Fehler zwischen quantisiertem Wert und dem idealen kontinuierlichen Wert. Er wird in Anzahl LSB angegeben.

Differenzielle Nichtlinearität: Idealerweise sind alle Quantisierungsstufen gleich breit. Die differenzielle Nichtlinearität (DNL) beschreibt den maximalen Stufenbreitenfehler in Anzahl LSB.

Merkhilfen für Umrechnungen					
K	Kelvin	°C +273,15 = K			

10^{24}	Yotta	Y
10^{21}	Zetta	Z
10^{18}	Exa	E
10^{15}	Peta	P
10^{12}	Tera	T
10^{9}	Giga	G
10^{6}	Mega	M
10^{3}	Kilo	k
10^{2}	Hekto	h
10^{1}	Deka	da

Komma nach links → 10^1

10^{-1}	Dezi	d
10^{-2}	Zenti	c
10^{-3}	Milli	m
10^{-6}	Mikro	µ
10^{-9}	Nano	n
10^{-12}	Piko	p
10^{-15}	Femto	f
10^{-18}	Atto	a
10^{-21}	Zepto	z
10^{-24}	Yokto	Y

Komma nach rechts → 10^{-1}

$$\frac{x}{2\pi} = \frac{\alpha}{360°}$$