



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	<b>Grundlagen 1.2</b>	18.02.2025

### Inhaltsverzeichnis:

1.2	Analoge und digitale Messtechnik.....	3
1.2.1	Digitalmessgeräte .....	3
1.2.2	Pro und Contra.....	4
1.2.3	Messfehler bei Digitalmessgeräten .....	5
1.2.4	Analogmessgeräte .....	7
1.2.4.1	Dreheisenmesswerk.....	7
1.2.4.2	Drehspulmesswerk .....	9
1.2.4.3	Kreuzspulmesswerk (Quotientenmesswerk).....	11
1.2.4.4	Elektrodynamisches Messwerk (eisengeschlossen).....	14
1.2.4.5	Vibrations-Messwerk.....	15
1.2.5	Sinnbilder zur Gerätekennzeichnung .....	17
1.2.6	Messbereichserweiterung.....	18
1.2.6.1	Umschaltbare Strommessbereiche.....	18
1.2.6.2	Umschaltbare Spannungsmessbereiche .....	21
1.2.6.3	Strom-Spannungs-Umformung mit Messwiderständen.....	22
1.2.6.4	Metalllegierungen für Messwiderstände.....	26
1.2.7	Widerstandsmessung .....	27
1.2.7.1	Messprinzipien .....	27
1.2.7.2	Direkte analoge Messung.....	28
1.2.7.3	Direkte digitale Messung.....	29
1.2.7.4	Indirekte Messung .....	30
1.2.7.5	Korrekturformeln für die indirekte Messung.....	31
1.2.7.6	Brückenschaltungen.....	32
1.2.7.6.1	Brückenspannung.....	32
1.2.7.6.2	Abgleichbedingung .....	33
1.2.8	Messen von Wechselgrößen.....	35
1.2.8.1	Gleichrichterioden .....	36
1.2.8.2	Kenngößen der Gleichrichtung .....	39
1.2.8.2.1	Der Gleichrichtwert.....	39
1.2.8.2.2	Der Formfaktor.....	40
1.2.8.2.3	Der Scheitelfaktor (Crestfaktor).....	40



Ingenieurwesen II	<b>Sensor- und Steuerungstechnik (SST)</b>	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	<b>Grundlagen 1.2</b>	18.02.2025

1.2.8.3	Schaltungen zur 2-Wege-Gleichrichtung (Mittelwertgleichrichtung):	42
1.2.8.4	Spitzenwert-Gleichrichtung (Schaltungsbeispiel):	44
1.2.8.4.1	Schaltungen für Spitzenwert-Gleichrichtung:	47
1.2.9	Operationsverstärker, Standardschaltungen:	49
1.2.9.1	Der Nicht Invertierer	49
1.2.9.2	Der Invertierer	50
1.2.9.3	Der Summierer	52
1.2.9.4	Der Komparator:	53
1.2.10	Analog-Digital- / Digital-Analog-Wandlung	55
1.2.10.1	Digital-Analog-Wandler:	55
1.2.10.2	Analog-Digital-Wandler:	58
1.2.10.3	Abtastung (Sampling) von Analogsignalen:	61
1.2.10.4	Signalquantisierung	63
1.2.10.5	Verfahren zur Analog-Digital-Wandlung	65
1.2.10.6.1	Integrierender ADU, Dual Slope - ADU	67
1.2.10.6.2	ADU nach dem Verfahren der sukzessiven Approximation:	69
1.2.10.6.3	Parallel - ADU	72
1.2.10.6.4	Sigma Delta - ADU, der interpolative Wandler	74
1.2.10.6	Fehler bei der Datenumsetzung	76



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	<b>Grundlagen 1.2</b>	18.02.2025

## 1.2 Analoge und digitale Messtechnik

### 1.2.1 Digitalmessgeräte

Die digitalen Messgeräte haben die praktische Messtechnik wesentlich vereinfacht und in gewissem Rahmen finanzierbar gemacht. Heute gehört das DMM (Digitalmultimeter) zur Standardausrüstung eines jeden EMSR-Handwerkers.

Analoge Multimeter, wenn sie dann eine höhere Güte haben sollen, sind in der Regel groß und damit unhandlich. Da es



(Abbildung Fa. Fluke)

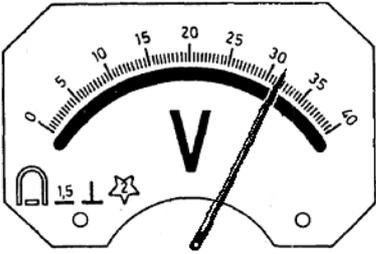
sich um Fein- bzw Elektromechanik handelt, bedarf es auch einer besonderen Sorgfalt im Umgang mit diesen Geräten. Das DMM nicht ohne Fehler sind und nur den Anschein erwecken genauer als analoge MM Zu sein, wird im Verlauf der Vorlesung noch näher spezifiziert.

Beim DMM handelt es sich einfach um ein elektronisches Messgerät zur Durchführung von elektrischen Messungen. Es kann im Gegensatz zum Analogmultimeter mit jeder Menge von Sonderfunktionen ausgestattet sein, aber mit einem DMM werden hauptsächlich Spannung (Volt), Widerstand (Ohm) und Strom (Ampère) gemessen.



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

### 1.2.2 Pro und Contra

- + Mit einem Blick kann man den gesamten Messbereich erfassen.
  - + Die relative Größe des Messwertes bezogen auf den Messbereichendwert, kann direkt eingeschätzt werden.
  - + Messwertschwankungen (Maxima und Minima) können besser erkannt werden.
  - + Für die direkte Strom und Spannungsmessungen wird keine Batterie benötigte.
  - Stossempfindlichkeit der Messgeräte abhängig von der Lagerungsart des Messwerkes (Zapfen-, Spitzen- und Spannbandlagerung).
  - Zu große Umkehrspanne (Reibungsfehler) bei falscher Gebrauchslage.
  - Mehrfach belegte Messskalen führen zu Ablesefehlern.
  - Qualitätsvielfachmessgeräte sind um ein Vielfaches teurer als Digitalvielfachmessgeräte.
- 
- + Keine Gebrauchslage vorgegeben.
  - + Direkte Ablesung des Messwertes mit Nachkommastelle, Polarität und Einheit.
  - + Robuster Aufbau (nicht stoßempfindlich).
  - + Ein Datenexport ist leicht möglich, da die Messwerte schon digitalisiert sind (USB, V24, RS232 etc.).
  - + Gutes PreisLeistungsverhältnis.
  - Zum Messen wird immer eine Hilfsenergie (Batterie) benötigt.
  - Einfache Digitalvielfachmessgeräte haben keine automatische Bereichsumschaltung, dies kann zu höheren Messfehlern führen (Grundfehler u. Quantisierungsfehler)
  - Die relative Größe des Messwertes ist schlecht einschätzbar -- wird fortgesetzt --
- 



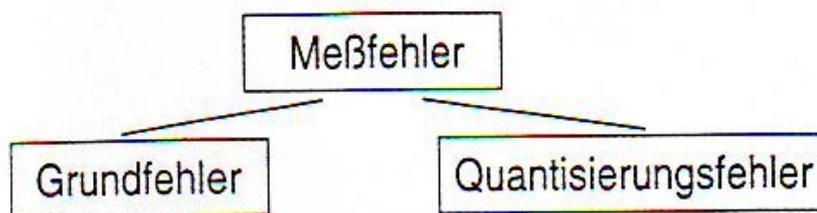
Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

### 1.2.3 Messfehler bei Digitalmessgeräten

Digitale anzeigende Messgerät vermitteln durch die eindeutige Anzeige meist den Eindruck, dass sie den Messwert absolut richtig anzeigen. Da aber auch diese Geräte toleranzbehaftete Bauteile enthalten, muss auch ihre Anzeige Messunsicherheiten enthalten. Die Genauigkeit von Digitalmessgeräten entspricht aber meist der von analog arbeitenden Feinmessgeräten.

Angaben über die Genauigkeit von digitalen Messgeräten finden sich üblicherweise in der Bedienungsanleitung.

Bei Digitalmessgeräten unterscheidet man Grund- und Quantisierungsfehler.



Der Grundfehler entsteht durch die toleranzbehafteten Bauteile des Analog- Digital-Wandlers; er wird in Prozent vom angezeigten Messwert angegeben und beträgt meist 0,5% bis 1%.

Der Quantisierungsfehler beruht auf der mehr oder weniger großen Auflösung des A/D-Wandlers; er beträgt 1 bis 5 Digits.

Die Angabe des zulässigen Gesamtfehlers kann z.B.  $F_{\max} = \mp (0,5\% + 2 \text{ Digit})$  lauten.

**Hinweis: In den Betriebsanleitungen wird häufig der zulässige Gesamtfehler als Grundfehler bezeichnet!**



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	<b>Grundlagen 1.2</b>	18.02.2025

### Beispiel:

Gegeben: 4 ½ stellige Anzeige  
Messbereich = 200V  
Fehler:  $F_{\max} = \mp (0,5\% + 4 \text{ Digit})$

Gesucht: Welcher absoluter und prozentualer Fehler tritt bei einer Messanzeige von 125,20V auf?

Aus der Angabe 4 ½ stellige Anzeige ergibt sich für die Darstellung des Messbereichsendwertes:



Berechnung des **Grundfehlers**:  $F_G = \mp 0,5\% * 125,20V = \mp 0,626V$

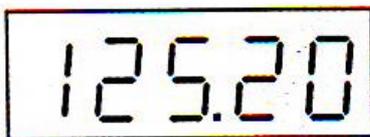
Berechnung des **Quantisierungsfehlers**:

Anzeigeumfang 19999 Digits d.h. 20000 Messschritte zu je 10mV =  $U_{MS}$

$$F_Q = \mp 4 \text{ Digits} * U_{MS} = \mp 4 * 10mV = \mp 0,04V$$

**Maximaler absoluter Fehler:**  $F = \mp (0,626V + 0,04)V = \underline{\underline{\mp 0,666V}}$

**Maximaler relativer Fehler:**  $F_{\%} = F / x = \mp 0,666V * 100\% / 125,20V$



$$\underline{\underline{F_{\%} = \mp 0,53\%}}$$

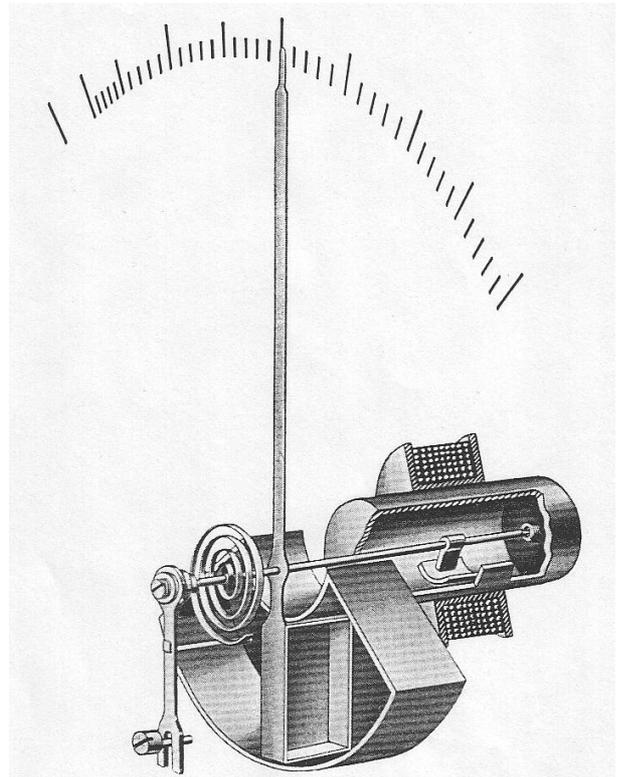


Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	<b>Grundlagen 1.2</b>	18.02.2025

### 1.2.4 Analogmessgeräte

#### 1.2.4.1 Dreheisenmesswerk

Innerhalb einer Ringspule sind zwei Eisenkerne angeordnet. Der eine ist an dem Spulenkörper, der andere an einer drehbaren Achse befestigt. Fließt der zu messende Strom durch die Spule, so entsteht ein Feld, das durch den feststehenden Eisenkern beeinflusst wird. Auf den beweglichen Eisenkern wirkt dann eine Kraft, die ihn zur Stelle größter Kraftlinienendichte zu verschieben sucht. Die Achse mit dem Eisenkern wird so weit gedreht, bis die zunehmende Spannung der Spiralfeder dem Drehmoment des Eisenkernes das Gleichgewicht hält. Das Messwerk hat Luftdämpfung.



Durch geeignete Form der Eisenkerne kann eine dem jeweiligen Verwendungszweck entsprechende Skalenteilung erreicht werden. Nahezu gleichmäßige Skalenteilungen, z. B. bei Präzisions-Instrumenten, sind ebenso möglich wie im interessierenden Bereich gedehnte und im übrigen gedrängte Skalenteilungen, z. B. bei Betriebs-Instrumenten. Die Magnetisierung der Eisenkerne folgt auch einem raschen Wechsel der Stromrichtung, so daß außer Gleichstrom auch Wechselstrom bis 1000 Hz gemessen werden kann. Je nach Art der Spulenwicklung werden die Instrumente als Strom- oder Spannungsmesser ausgeführt.



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

Skalengleichung des Dreheisenmessgerätes:

4.)  $M_{\text{MAGN.}} \sim B \cdot I_M$       1.)  $B = \mu_0 \cdot H$

3.)  $B = \mu_0 \cdot \frac{I_M \cdot N}{l}$       2.)  $H = \frac{I \cdot N}{l}$

5.) Da  $\mu_0, N$  und  $l$  konstant sind folgt:

6.)  $M_{\text{MAGN.}} \sim \mu_0 \cdot \frac{I_M \cdot N}{l} \cdot I_M$

7.)  $M_{\text{MAGN.}} \sim I_M^2$

Da  $M_{\text{MECH}} \sim \alpha$  folgt:  $\alpha \sim I_M^2$  SKALENGLEICHUNG

AUS DER SKALENGLEICHUNG FOLGT:

1. DIE SKALA IST NICHT LINEAR
2. POLARITÄTSUNABHÄNGIGKEIT

DIE LINEARISIERUNG DER MESSGERÄTESKALEN ERFOLGT DURCH DIE:

- FORM DER PLÄTCHEN
- FORM DER SPULE
- EINE EXZENTRISCHE WELLE

EINSATZBEREICHE VON DREH- SPUL- UND DREHEISENMW AM BEISPIEL DER VERLUSTLEISTUNG:

	$P_M$
	$10^{-4} \dots 10^{-2} \text{ W}$
	$0,5 \dots 3 \text{ W}$ ←

DA EINE GROSSE IN- DUKTION  $B$  ERZEUGT WERDEN MUSS

TYPISCHE-SKALA

ÜBERLAST-SKALA

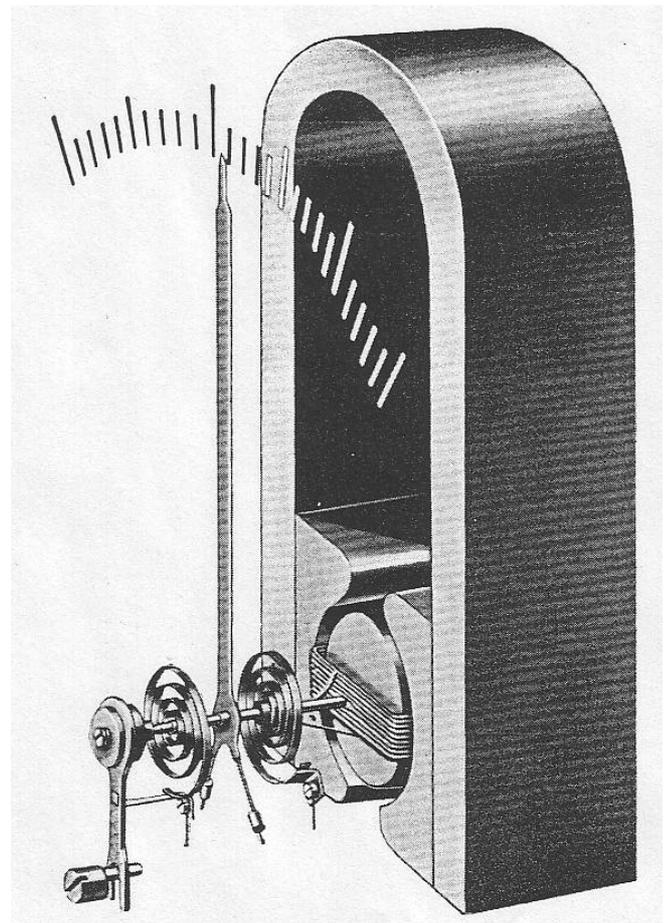
VOLTLUPE



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

### 1.2.4.2 Drehspulmesswerk

Das Drehspul-Messwerk besteht aus einer Spule, die im homogenen Feld eines kräftigen Dauermagneten um einen Weicheisenkern drehbar gelagert ist. Im stromlosen Zustand wird sie durch zwei Spiralfedern, die gleichzeitig als Stromzuleitungen dienen, in der Null-Lage gehalten. Fließt Gleichstrom durch die Spule, so entsteht ein Drehmoment, das der Stromstärke verhältnismäßig ist. Die Spule mit Zeiger dreht sich so weit, bis die Gegenkraft der Spiralfedern dem Drehmoment der Spule das Gleichgewicht hält. Die Drehspule ist auf ein Aluminiumrähmchen gewickelt; in diesem entstehen bei der Drehung im Magnetfeld Wirbelströme, die das Messwerk dämpfen.

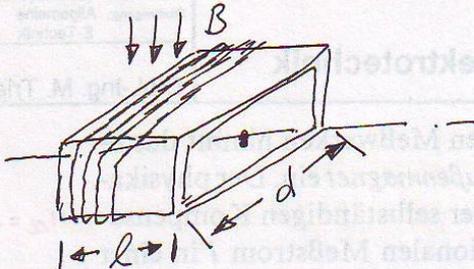


Das Drehspul-Messwerk ist das messempfindlichste elektrische Messwerk. Ströme in der Größenordnung von Milliardstel Ampere können damit gemessen werden. Durch Vorschalten eines Gleichrichters oder eines Thermoumformers sind auch Wechselströme bis zu hohen Frequenzen messbar. Daher werden Wechselstrommessungen vielfach auf Gleichstrommessungen zurückgeführt, um so die hohe Empfindlichkeit des Messwerks auszunutzen.



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

Skalengleichung des Drehspulmessgerätes:



$B = \text{INDUKTION}$   
 $w = \text{WINDUNGSZAHL}$   
 $I_M = \text{MESSSTROM}$   
 $d = \text{RÄHNCHENDURCH}$   
 $l = \text{RÄHNCHENHÖHE}$   
 $\alpha = \text{ZEIGERAUSSCHLAG (FEDERAUSLENKUNG)}$

ALURAHMEN MIT WICKLUNG

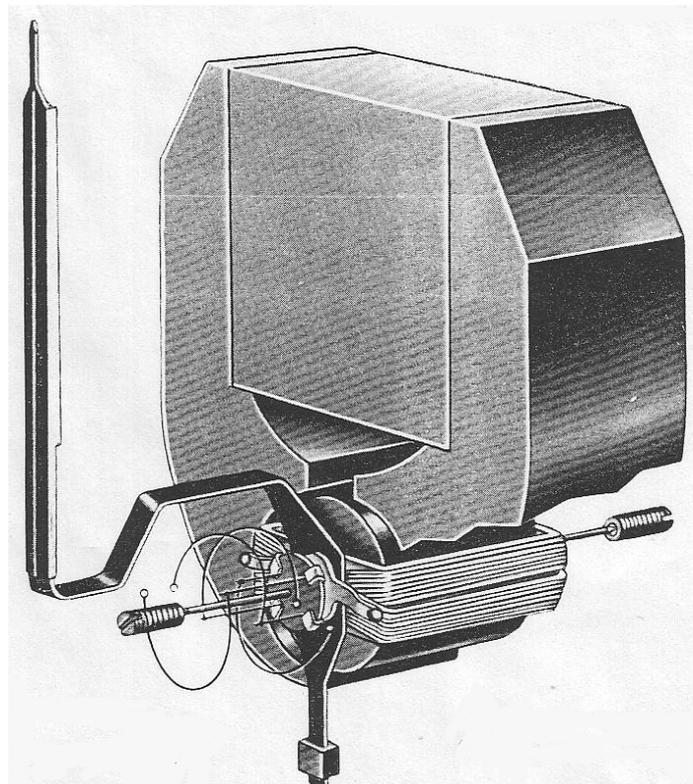
1. KRAFT AUF EINEN LEITER  
$$F = I_M \cdot w \cdot B \cdot l$$
2. DAS MAGNETISCHE MOMENT LAUFET  
$$M_{EL} = 2 \cdot F \cdot \frac{d}{2}$$
  
$$M_{EL} = I_M \cdot w \cdot B \cdot l \cdot d$$
  
$$M_{EL} = I_M \cdot w \cdot B \cdot A$$
  
$$l \cdot d = A$$
  
↑ ↑ ↑  
KONSTANTE GRÖSSEN
3. PRINZIP DER SELBSTSTÄNDIGEN KOMPENSATION  
MECHANISCHES MOMENT  $M_{MECH} = C \cdot \alpha$   
$$M_{EL} = M_{MECH}$$
  
$$I_M = C \cdot \alpha$$
  
↑  
FEDERKONSTANTE  
$$\alpha \sim I_M$$
 SKALENGLEICHUNG



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	<b>Grundlagen 1.2</b>	18.02.2025

### 1.2.4.3 Kreuzspulmesswerk (Quotientenmesswerk)

Zwei miteinander fest verbundene, gekreuzte Spulen sind innerhalb eines Magneten um einen Eisenkern drehbar angeordnet. Der Luftspalt zwischen Magnet und Kern nimmt von der Mitte aus nach oben und unten ab, die Induktion im gleichen Maße zu. Der Strom wird über richtkraftfreie Metallbänder zugeleitet. An der einen Spule entsteht ein linksdrehendes, an der anderen ein rechtsdrehendes Drehmoment. Sind die Ströme in den Spulen gleich, so heben sich beide Drehmomente nur



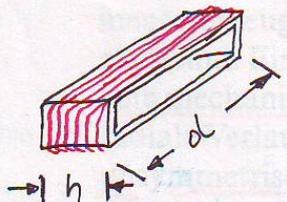
dann auf, wenn auch die an jeder Spule wirksamen Induktionen gleich sind. Ist einer der beiden Ströme schwächer als der andere, so nimmt die Kreuzspule eine bestimmte andere Lage ein, bei der sich die vom schwächeren Strom durchflossene Spule im Gebiet höherer Induktion und die vom stärkeren Strom durchflossene Spule im Gebiet geringer Induktion befindet, damit sich beide Drehmomente wieder aufheben. Der Zeiger zeigt somit unabhängig von der Höhe der Messspannung nur das Stromverhältnis an.



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

Skalengleichung des Kreuzspulmessgerätes:

**ANALOGIE ZUM DRAHTSPULMESSWEIL:**



1. KRAFT AUF EINEN LEITER  
 $F = I_M \cdot w \cdot B \cdot h$

2. DAS MAGNETISCHE MOMENT  
 $M_{EL} = F \cdot d$

$M_{EL} = I_M \cdot w \cdot B \cdot h \cdot d$       $h \cdot d = A$   
 $M_{EL} = I_M \cdot w \cdot B \cdot A$

$w$  UND  $A$  KONSTANT

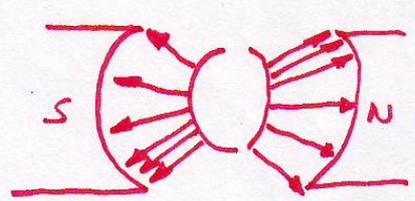
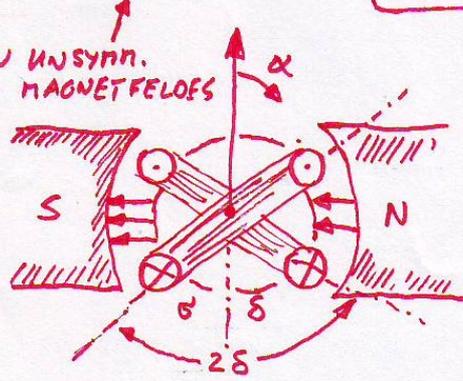
$M_{EL_1} = I_{M_1} \cdot \cos(\alpha - \delta)$      SPULE 1  
 $M_{EL_2} = I_{M_2} \cdot \cos(\alpha + \delta)$      SPULE 2

$I_{M_1} \cdot \cos(\alpha - \delta) = I_{M_2} \cdot \cos(\alpha + \delta)$

feldverhältnis zu

$\frac{I_1 w_1}{I_2 w_2} = \frac{\cos(\alpha - \delta)}{\cos(\alpha + \delta)} \Rightarrow$  **VEREINFACHT**  $\alpha = \frac{I_1}{I_2}$

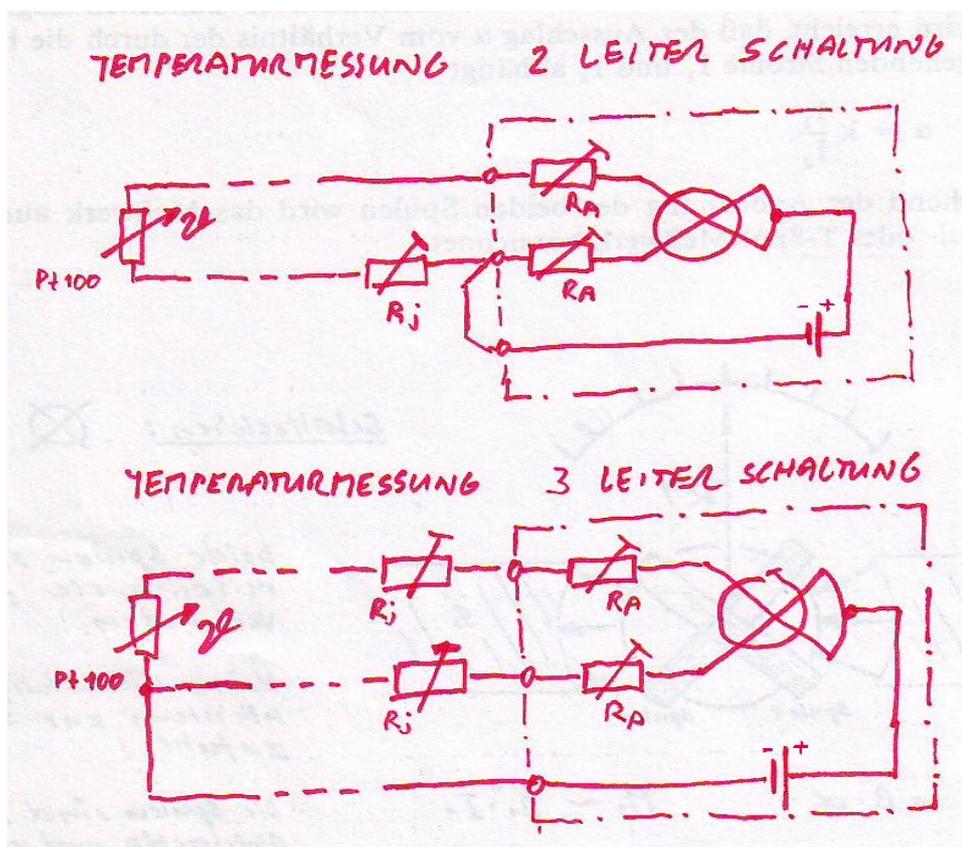
**COS DURCH DEN UNSYMM. VERLAUF DES MAGNETFELDES**



**UNSYMMETRISCHES MAGNETFELD**

Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	<b>Grundlagen 1.2</b>	18.02.2025

Die beiden Prinzip-Schaltbilder zeigen die praktische Anwendung der Stromverhältnismessung. Es handelt sich um die klassische **2-Leiter und 3-Leiterschaltung**. Die Widerstände  $R_A$  sind die sogenannten Abgleichwiderstände, die für die Kalibrierung des Messgerätes, den Grundabgleich benötigt werden. Die Widerstände  $R_j$  sind die sogenannten Justagewiderstände, mit deren Hilfe der gesamte Loop abgeglichen bzw. justiert werden kann.



Werden beide Stromzweige von einer Spannungsquelle gespeist und ist der Widerstand in einem Zweig konstant und im anderen veränderlich, so hängt der Zeigerausschlag nur von der Größe des veränderlichen Widerstandes ab (Schaltung des Widerstandsthermometers, Pt100 / Ni100/ Pt1000).

Die 2-Leiterschaltung ist anfällig für die Einflüsse der Umgebungstemperatur, die 3-Leiterschaltung nicht!

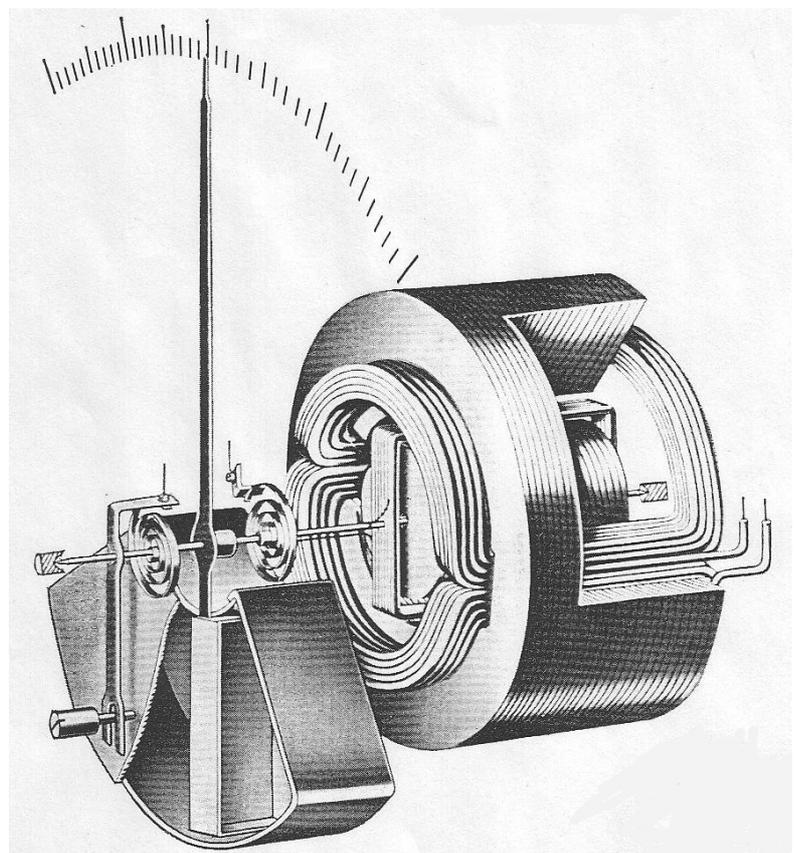
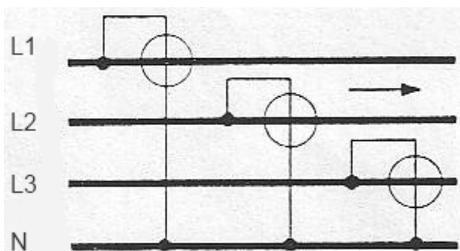


Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

### 1.2.4.4 *Elektrodynamisches Messwerk (eisengeschlossen)*

Bei dem eisengeschlossenen elektrodynamischen Messwerk ist die feste Spule in einen geschlossenen lamellierten Eisenring (auf dem Bild ist zur Einsicht ein Stück herausgeschnitten) eingebaut. Dadurch wird eine stärkere Einstellkraft der sich um einen lamellierten Eisenkern drehenden Spule bewirkt. Außerdem schützt der Eisenring vor störendem Einfluss fremder Felder. Instrumente mit diesem Messwerk sind insbesondere für betriebsmäßige Leistungsmessungen von Wechsel- und Drehstrom geeignet. Durch Kupplung der Achsen mehrerer Messwerke entstehen 2- und 3-fach Leistungsmesser. Bei eisengeschlossenen Messwerken für Gleichstrom-Leistungsmessungen wird im Gegensatz zu den anderen elektrodynamischen Messwerken wegen der Remanenz des Eisens der Spannungspfad fest und der Strompfad beweglich angeordnet. Das Messwerk hat kräftige Luftdämpfung.

Das Schaltbild zeigt die Leistungsmessung mit drei Messwerken in einem ungleich belasteten Vierleiter-Drehstrom-Netz. Die Leistung ist die Summe der Einzelanzeigen. Ein Dreifach-Leistungsmesser addiert die Drehmomente und zeigt die Leistung des Drehstromes unmittelbar an.

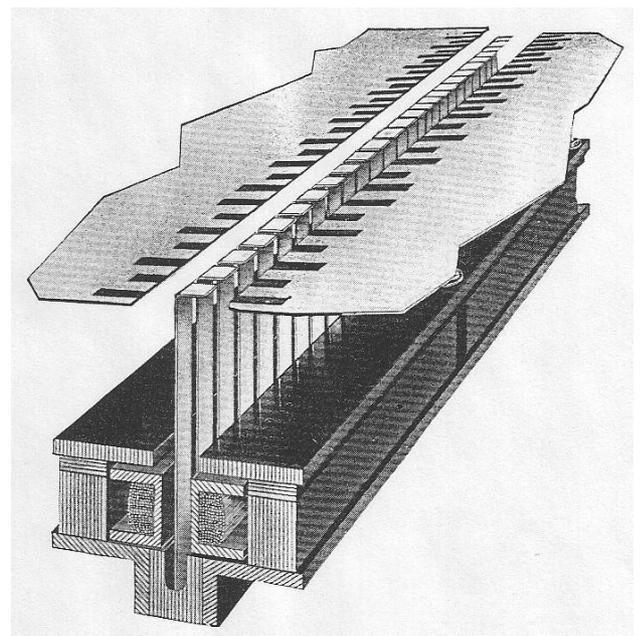




### 1.2.4.5 Vibrations-Messwerk

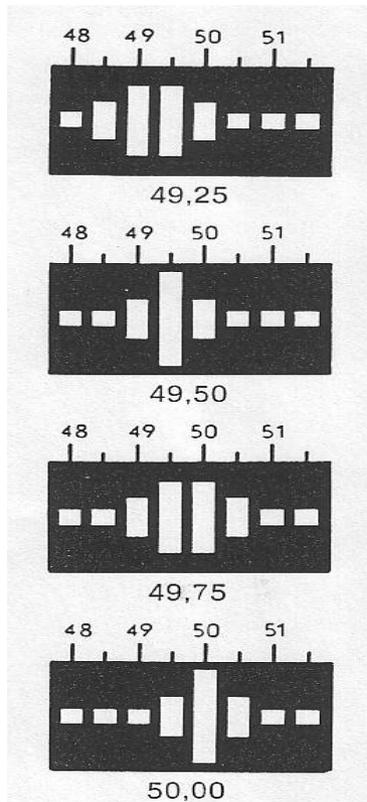


Das Vibrations-Messwerk dient zur Frequenzbestimmung des Wechselstromes. Eine Anzahl Stahlzungen ist auf bestimmte Eigenschwingungszahlen abgestimmt und in einer Reihe im Kraftfeld einer langgestreckten Spule angeordnet. Fließt Wechselstrom durch die Wicklung, so wird durch das Wechselfeld diejenige Zunge in Schwingung versetzt, deren Eigenschwingungszahl gleich der Polwechselzahl, das heißt der doppelten Frequenz des Wechselstromes ist.





Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	<b>Grundlagen 1.2</b>	18.02.2025



Die Zungen-Abstimmung wird so gewählt, dass außer der in Vollresonanz stehenden Zunge noch die benachbarten Zungen mit kleinerem Ausschlag mitschwingen. So entsteht ein kennzeichnendes Schwingungsbild, das auch Zwischenwerte zu schätzen gestattet.

In Verbindung mit einem kleinen Wechselstrom-Induktor werden die Messwerte zur Drehzahl-Fernmessung benutzt.

An Stelle der elektromagnetischen Erregung kann eine mechanische Erregung durch Erschütterungen treten. Durch Anhalten eines Zungenkammes (ohne Spule) an eine Maschine kann z. B. die Drehzahl einer umlaufenden Welle durch Mitschwingen bestimmter Zungen angezeigt werden (Vibrations-Drehzahlmesser).



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

### 1.2.5 Sinnbilder zur Gerätekenzeichnung

Diese Sinnbilder sind Teil der Skalenbeschriftung der analogen Messgeräte.

Art des Meßwerkes	Sinnbild	Art des Meßwerkes	Sinnbild
Drehspul-Meßwerk mit Dauermagnet		Meßwerk mit Eisenschirm (Sinnbild für den Schirm)	
Drehspul-Quotientenmeßwerk		Meßwerk mit elektrostatischem Schirm (Sinnbild für den Schirm)	
Drehmagnet-Meßwerk		Astatisches Meßwerk	ast
Dreheisen-Meßwerk		Gleichstrominstrument	—
Elektrodynamisches Meßwerk		Wechselstrominstrument	
Eisengeschlossenes, elektrodynamisches Meßwerk		Gleich- und Wechselstrom-Instrument	
Elektrodynamisches Quotientenmeßwerk		Drehstrominstrument mit einem Meßwerk	
Eisengeschlossenes elektrodynamisches Quotientenmeßwerk		Drehstrominstrument mit zwei Meßwerken	
Induktions-Meßwerk		Drehstrominstrument mit drei Meßwerken	
Bimetall-Meßwerk		Senkrechte Gebrauchslage	
Elektrostatisches Meßwerk		Waagerechte Gebrauchslage	
Vibrations-Meßwerk		Schräge Gebrauchslage mit Angabe des Neigungswinkels	
Thermoumformer allgemein		Zeigernullstellvorrichtung	
Drehspul-Meßwerk mit Thermoumformer		Prüfspannungszeichen : Die Ziffer im Stern bedeutet die Prüfspannung in kV (Stern ohne Ziffer 500 V Prüfspannung)	
Isolierter Thermoumformer		Achtung (Gebrauchsanweisung beachten)	
Gleichrichter		Instrument entspricht bezüglich Prüfspannung nicht den Regeln	
Drehspul-Meßwerk mit Gleichrichter			



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

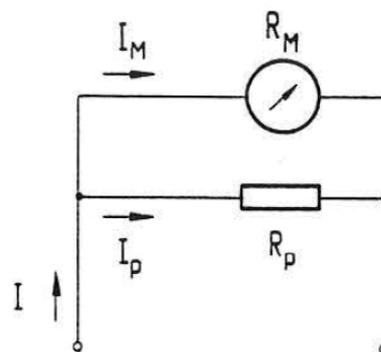
### 1.2.6 Messbereichserweiterung

In der täglichen Praxis sind Messgeräte mit mehreren umschaltbaren Messbereichen sehr vorteilhaft. Sie geben dem Anwender die gewünschte Flexibilität und gestatten die Messung niedriger und hoher Ströme oder Spannungen mit demselben Instrument. Eine derartige Messbereichs-umschaltung über weite Bereiche ist mit einfachen Mitteln nur beim Drehspulinstrument möglich und hat maßgebend zu dessen großer Verbreitung beigetragen.

#### 1.2.6.1 Umschaltbare Strommessbereiche.

Um mit einem Messwerk noch einen den Messbereich überschreitenden Strom  $I$  messen zu können, wird im Nebenschluss zum Messwerk mit dem Widerstand  $R_M$  der Parallelwiderstand  $R_P$  gelegt. Der gesamte zu messende Strom  $I$  teilt sich jetzt auf in einen Strom durch das Messwerk  $I_M$  und einen Strom  $I_P$  durch den Parallelwiderstand.

$$I = I_M + I_P$$



Der Spannungsabfall an  $R_M$  ist ebenso groß wie der an  $R_P$

$$R_M \cdot I_M = R_P \cdot I_P = R_P \cdot (I - I_M)$$

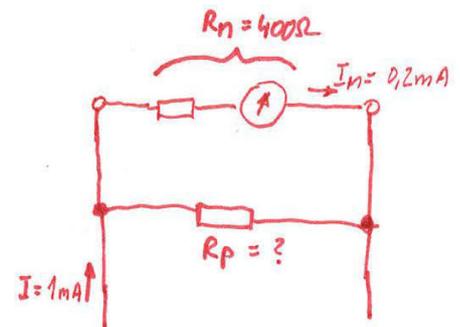
womit die Vorschrift zur Dimensionierung von  $R_P$  gewonnen ist:

$$R_P = R_M \frac{I_M}{I - I_M}$$



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

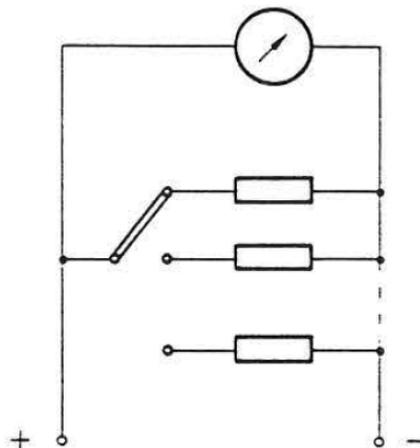
**Beispiel:** Hat das vorhandene Messwerk, bestehend aus Spule und Vorwiderstand zur Temperaturkompensation, z.B. einen Widerstand  $R_M = 400 \text{ Ohm}$  und einen Vollausschlag bei  $I_M = 0,2 \text{ mA}$ , und soll ein Strom  $I = 1 \text{ mA}$  gemessen werden, so ist ein Parallelwiderstand von



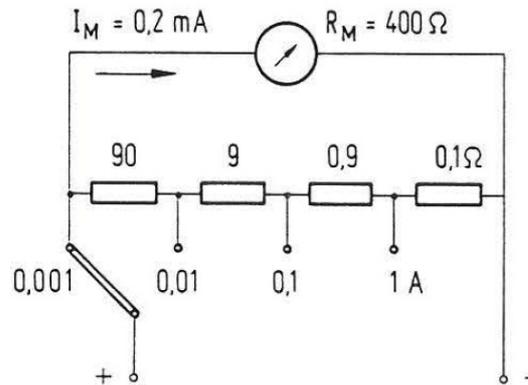
$$R_p = 400 \frac{0,2}{1 - 0,2} \Omega = 100 \Omega$$

erforderlich.

Auf diese Weise lassen sich Widerstände für weitere Messbereiche ermitteln, die dann über einen Umschalter parallel zum Messwerk gelegt werden können. Dabei ist die zunächst naheliegende Anordnung



ungeeignet. Hier liegen die Übergangswiderstände der Schaltkontakte in Reihe mit dem Parallelwiderstand und verfälschen das Verhältnis  $R_M/R_p$ . Besser ist, den für den niedrigsten Messbereich erforderlichen Widerstand aufzuteilen und über einen im Hauptzweig sitzenden Schalter anzuwählen



In unserem Beispiel wird der Widerstand von 100 Ohm durch die vier Widerstände 90 Ohm, 9 Ohm, 0,9 Ohm und 0,1 Ohm gebildet. Die Übergangswiderstände des Kontakts beeinflussen nicht mehr die Stromaufteilung in der Parallelschaltung. Sie addieren sich lediglich zum Innenwiderstand der Quelle und zu dem Lastwiderstand im Stromkreis und sind diesen gegenüber zu vernachlässigen.

**Beispiel:** Das Messgerät im vorangestellten Bild zeigt bei einem Strom

$$I_M = 0,2 \text{ mA}$$

Vollauschlag. Ist ein Messbereich von **100 mA** eingestellt, so liegen die Widerstände  $(9 + 90 + 400)$  Ohm und  $(0,9 + 0,1)$  Ohm parallel.

Mit  $I_P : I_M = 499 : 1$  und  $I_M = 0,2 \text{ mA}$  wird  $I_P = 99,8 \text{ mA}$ .

Wie beabsichtigt ist

$$I = I_M + I_P = 0,2 \text{ mA} + 99,8 \text{ mA} = \underline{\underline{100 \text{ mA}}}$$

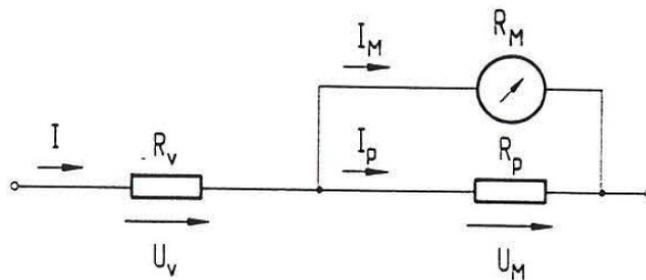


Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

### 1.2.6.2 Umschaltbare Spannungsmessbereiche

An dem Messwerk unseres Beispiels mit einem Messbereich von 1 mA liegt bei Vollausschlag die Spannung  $U_M$  von

$$U_M = 1 \text{ mA} \cdot (400 \text{ Ohm} \parallel 100 \text{ Ohm}) = 80 \text{ mV.} \quad = 1 \text{ mA} \cdot \frac{400 \Omega \cdot 100 \Omega}{500 \Omega}$$



Um höhere Spannungen messen zu können, wird ein Vorwiderstand verwendet. Die gesamte zu messende Spannung  $U$  fällt dann mit  $U_v$  am Vorwiderstand und mit  $U_M$  am Messwerk ab.

$$U = U_v + U_M = R_v \cdot I + (R_p \parallel R_M) \cdot I$$

Indem die letzte Gleichung umgestellt zur Dimensionierung von  $R_v$ :

$$R_v = \frac{U}{I} - (R_p \parallel R_M) \quad R_v = \frac{U}{I} - \frac{R_p \cdot R_M}{R_p + R_M}$$

Um mit unserem Messwerk 100 mV zu messen, ist also ein Vorwiderstand von

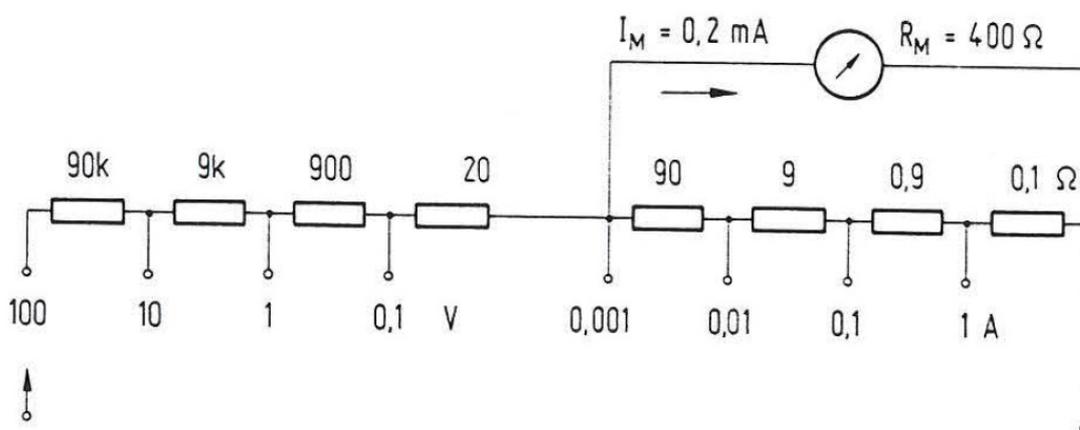
$$R_v = \frac{100 \text{ mV}}{1 \text{ mA}} - 80 \Omega = 20 \Omega$$

erforderlich.



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

Auf dieselbe Weise werden die Vorwiderstände für weitere Spannungsmessbereiche berechnet. Für den Messbereich 1 V ist bei einer Stromaufnahme von 1 mA ein Gesamtwiderstand von 1000 Ohm erforderlich. Da jedoch für den 0,1-V-Messbereich schon 100 Ohm vorhanden sind, wird zusätzlich nur noch ein Widerstand von  $1000 \text{ Ohm} - 100 \text{ Ohm} = 900 \text{ Ohm}$  benötigt



Die Spannungsmesser messen nur dann rückwirkungsfrei, wenn ihr Innenwiderstand genügend hoch ist. Dieser wird von den Herstellern auf den *Messbereichsendwert* bezogen. Die Angabe 1 kOhm/V (Kennwiderstand) z.B. bedeutet, dass – unabhängig von dem Ausschlag des Zeigers – im 100 V Messbereich ein Widerstand von 100 kOhm zwischen den Geräteklemmen liegt.

### 1.2.6.3 Strom–Spannungs–Umformung mit Messwiderständen

Die Aufgabe der proportionalen Umformung eines Messstromes  $I$  in eine Spannung  $U$  stellt sich allgemein bei der Messung des zeitlichen Verlaufs eines Stromes mit Hilfe eines Oszillographen, da dieser gewöhnlich nur Spannungseingänge besitzt; die gleiche Aufgabe stellt sich auch bei der Messung hoher Gleichströme, die direkt nicht mehr gemessen werden können.



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

Die Güte der Umformung gemäß  $U = R \cdot I$  hängt von der Präzision des Widerstandes  $R$  ab. Dieser Widerstandswert soll nicht nur möglichst exakt abgeglichen, sondern außerdem weitgehend unabhängig

- vom Messstrom (Eigenerwärmung),
- von der Umgebungstemperatur (Fremderwärmung),
- von der Anschlusstechnik,
- von Alterungseffekten und
- von der Betriebsfrequenz

sein. Daneben sind eine möglichst geringe Thermospannung gegen Kupfer und ein vergleichsweise hoher spezifischer Widerstand wünschenswert. Reine Metalle sind vorwiegend wegen des zu hohen Temperaturkoeffizienten von etwa  $4 \cdot 10^{-3} /K$ , teilweise auch wegen des zu geringen spezifischen Widerstandes, als Werkstoff für Messwiderstände ungeeignet.

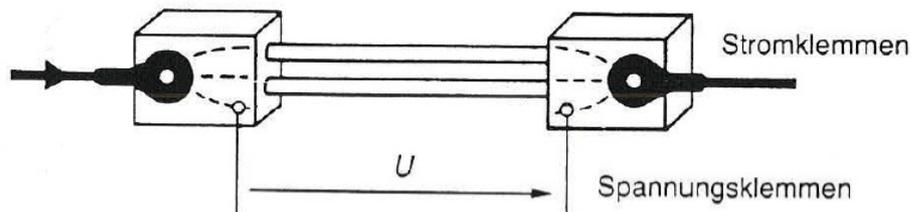
Bei vergleichsweise niedrigen Anforderungen verwendet man Kohle- oder Metallschichtwiderstände; ebenso für hochohmige Messwiderstände, die dann gewandelt oder mäanderförmig ausgeführt werden.

Eine Abgleichtoleranz und Langzeitstabilität von 0,5 %, bestenfalls 0,1 %, wird dabei erreicht. Widerstandswerte von ca. 10 Ohm bis über 10 MOhm sind realisierbar.

Bei höheren Anforderungen an die Genauigkeit und bei niederohmigen Widerständen bieten sich Drähte oder Stäbe (Shunt) aus bestimmten Metalllegierungen an.



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025



Niederohmiger Meßwiderstand in Vierleitertechnik.

*Niederohmige* Mess-Widerstände müssen in Vierleitertechnik ausgeführt werden, damit der Einfluss von Übergangs- und Zuleitungswiderständen genügend klein gehalten werden kann. Gemäß der vorgelagerten Abbildung fließt der Messstrom / durch die konstruktiv außen liegenden Stromklemmen, während an den innen angeordneten Spannungsklemmen (Potentialklemmen) die eigentliche Messspannung  $U$  abgegriffen wird.

Der Messwiderstand  $R = U / I$  wird damit unabhängig von Übergangs- und Zuleitungswiderständen, die außerhalb der Potentialklemmen wirksam sind. Lediglich eine veränderte Stromverteilung durch unterschiedliche Kontaktwiderstände könnte den wirksamen Messwiderstand beeinflussen. Dem wird aber durch Anschlussstücke aus Cu mit hoher Leitfähigkeit entgegengewirkt.

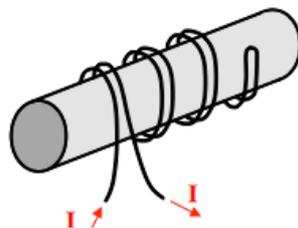


Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

Die zulässige Eigenerwärmung von Messwiderständen richtet sich nach den Anforderungen und liegt gewöhnlich mehrere K, im Ausnahmefall sogar mehrere 10 K über der Umgebungstemperatur. Welche Leistung dabei im Messwiderstand umgesetzt werden darf, hängt sehr stark von der Oberfläche des Messwiderstandes ab. Es ist vorteilhaft, die Konstruktion hochbelastbarer Messwiderstände so zu wählen, dass Luftzirkulation gewährleistet ist.

Gewickelte Messwiderstände mit hoher *Langzeitkonstanz* müssen bei etwa 150 °C ungefähr 10 h *gealtert* werden, damit sich die beim Wickeln entstandenen mechanischen Spannungen abbauen können. Langzeitschwankungen von weniger als  $10^{-4}$  sind auf diese Weise erreichbar.

Beim Betrieb von Messwiderständen bei *höheren Frequenzen* muss in erster Linie auf geringe Eigeninduktivität, aber auch auf geringe Eigenkapazität geachtet werden. Wicklungen auf flachen Wicklungsträgern besitzen geringere Induktivitäten als auf zylindrischen Trägern. Bifilare Wicklungen



Bifilare Wicklung

vermindern die Eigeninduktivität sehr stark. Um gleichzeitig geringe Eigenkapazität zu erzielen, sind spezielle Wicklungsarten, wie z.B. die Chaperon-Wicklung, zu empfehlen.

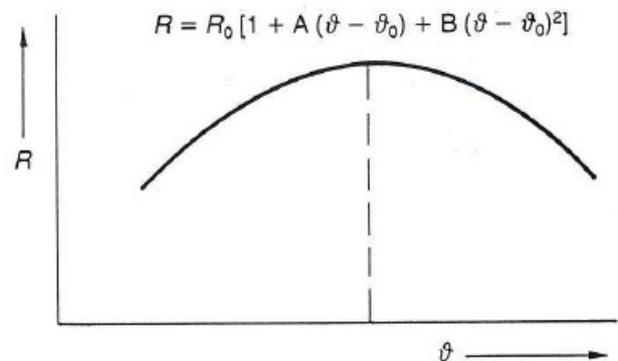


Chaperon-Wicklung



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

Seit vielen Jahrzehnten hat sich Manganin als Widerstandswerkstoff sehr gut bewährt. Gute Alternativen stellen die Legierungen Isohm und Konstantan dar. Die Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes dieser Widerstandslegierungen von der Temperatur verläuft näherungsweise parabelförmig. Der Parabelscheitel liegt dabei gewöhnlich bei Temperaturen zwischen 30°C und 50 °C .



Der Betrag der relativen Widerstandsänderung liegt in einem Temperaturbereich von - 20 °C bis + 80 °C im-Mittel bei einigen  $10^{-5}/K$ . In der Umgebung des Extremums sind die temperaturbedingten Widerstandsänderungen sogar noch kleiner.

### 1.2.6.4 Metalllegierungen für Messwiderstände

LEGIERUNG	ZUSAMMENSETZUNG	SPEZIF. WIDERST. [ $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ ]	THERMOSP. $\rightarrow$ CU [ $\text{mV}/\text{K}$ ]	WEITERE VERÄNDERUNG
MANGANIN	86% Cu; 12% Mn 2% Ni	0,43	$\approx 1,0$	LÖTLBAR
ISOHM	71% Ni ; 21% Cr SONSTIGE ZUSÄTZE	1,32	$< 1,0$	NICHT LÖTLBAR
KONSTANTAN	54% Cu ; 45% Ni 1% Mn	0,5	40,0	SCHLECHT LÖTLBAR



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

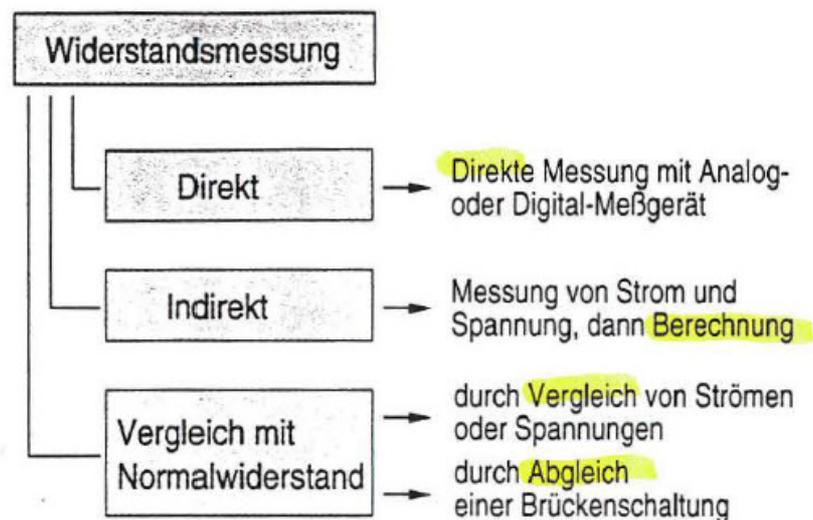
### 1.2.7 Widerstandsmessung

#### 1.2.7.1 Messprinzipien

Die Bestimmung des Widerstandswertes eines Ohmschen Widerstandes kann nach mehreren Prinzipien erfolgen. Am einfachsten ist die direkte Messung; sowohl analoge als auch digitale Messgeräte bieten die Möglichkeit, Widerstandswerte direkt zu messen.

Der Widerstand kann auch indirekt mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes aus einer Spannungs- und einer Strommessung bestimmt werden. Sehr genaue Messergebnisse bietet der Vergleich mit hochpräzisen Normalwiderständen.

Der Vergleich kann über einen Spannungs- oder Stromvergleich realisiert werden, oder durch ein Abgleichverfahren mit Hilfe einer Brückenschaltung.



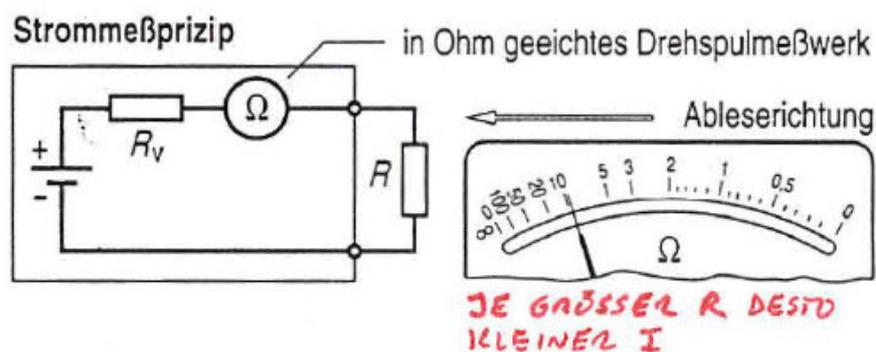


Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

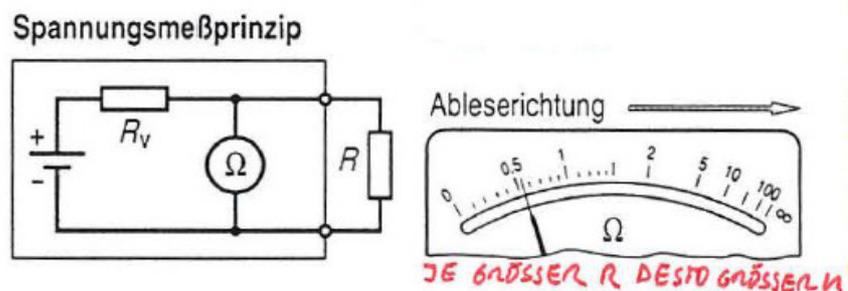
### 1.2.7.2 Direkte analoge Messung

Analoge Messgeräte mit einem Drehspulmesswerk eignen sich gut als Widerstandsmessgerät (Ohmmeter); Voraussetzung ist aber, dass sie eine eigene Spannungsquelle (Batterie) besitzen. Je nach Schaltung des Messwerks unterscheidet man das Strommessprinzip und das Spannungsmessprinzip.

Beim meist verwendeten Strommessprinzip liegt das Messwerk in Reihe zum Messobjekt. Da der Strom mit zunehmendem Widerstand abnimmt verläuft die Skale von rechts nach links; sie ist stark nichtlinear.



Beim Spannungsmessprinzip liegt das Messwerk parallel zum Messobjekt. Da die Spannung am Messobjekt mit zunehmendem Widerstand größer wird, verläuft die Skale von links nach rechts; sie ist ebenfalls nichtlinear.



Bei beiden Messprinzipien geht die Batteriespannung in das Messergebnis ein. Vor jeder Messung sollte daher ein Nullabgleich gemacht werden.



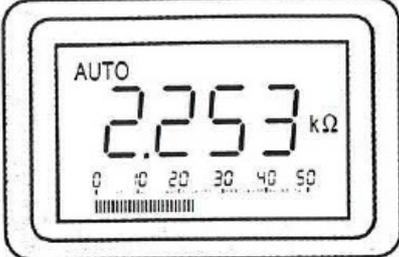
Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

### 1.2.7.3 Direkte digitale Messung

Digitale Messgeräte verdrängen in zunehmendem Maße die zum Teil sehr teuren, schwierig abzulesenden und nicht sehr genauen Analoggeräte.

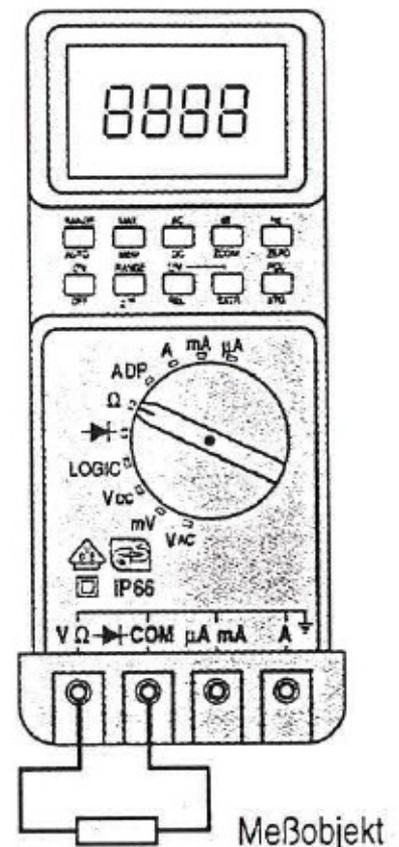
Die einfachste Möglichkeit besteht in der Verwendung einer Konstantstromquelle. Wird der Messwiderstand  $R_x$  an die Konstantstromquelle angeschlossen, so fließt in ihm stets der gleiche Strom, unabhängig von seinem Widerstandswert. Der Spannungsfall am Messwiderstand ist somit proportional zum Widerstandswert  $R_x$ .

Der Spannungsfall kann mit einem digitalen Spannungsmesser gemessen werden, die Anzeige ist in Widerstandswerten geeicht. Konstantstromquellen können auch in analogen Instrumenten eingesetzt werden; man erhält dann eine lineare, von links nach rechts laufende Widerstandsskala.



Die Meßunsicherheit ist vom Meßbereich abhängig. Die Tabelle zeigt Daten eines Geräteherstellers:

Meßbereich	Unsicherheit
300 $\Omega$	$\pm (0,2\% + 30 \text{ Dig.})$
3 k $\Omega$	$\pm (0,2\% + 6 \text{ Dig.})$
30 k $\Omega$	$\pm (0,2\% + 6 \text{ Dig.})$
300 k $\Omega$	$\pm (0,2\% + 6 \text{ Dig.})$
3 M $\Omega$	$\pm (0,4\% + 6 \text{ Dig.})$
30 M $\Omega$	$\pm (1,5\% + 6 \text{ Dig.})$



Bei analoger oder digitaler Widerstandsmessung muss der zu messende Widerstand unbedingt stromlos sein!



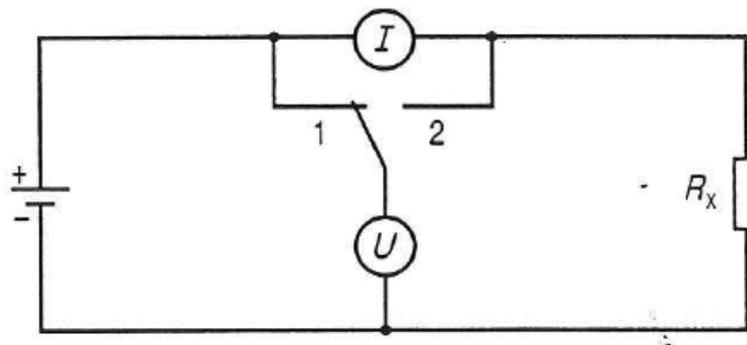
Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

### 1.2.7.4 Indirekte Messung

Die indirekte Widerstandmessung beruht auf der gleichzeitigen Messung von Spannung und Strom am unbekanntem Widerstand. Der Widerstand wird dann mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes  $R = U / I$  berechnet.

Die Messung enthält in jedem Fall einen durch die Messschaltung bedingten systematischen Fehler. Wird das Spannungsmessgerät vor dem Strommessgerät geschaltet, so entsteht die Spannungsfehlerschaltung (Stromrichtige Messung); sie eignet sich für Widerstände, die wesentlich größer sind als der Innenwiderstand des Strommessgerätes.

Wird das Strommessgerät vor das Spannungsmessgerät geschaltet, so entsteht die Stromfehlerschaltung (Spannungsrichtige Messung); sie eignet sich für Widerstände, die wesentlich kleiner sind als der Innenwiderstand des Spannungsmessgerätes.



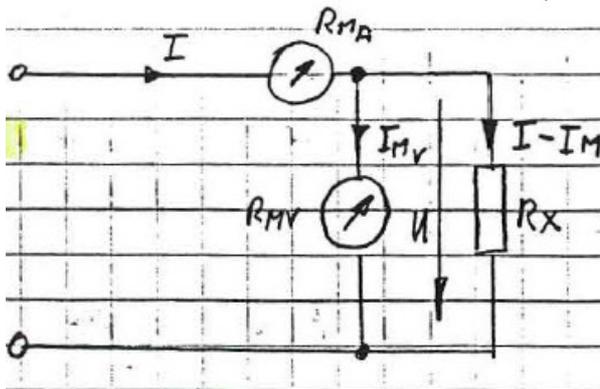
Stellung 1: Spannungsfehlerschaltung, besonders geeignet für große Messwiderstände.

Stellung 2: Stromfehlerschaltung besonders geeignet für kleine Messwiderstände.



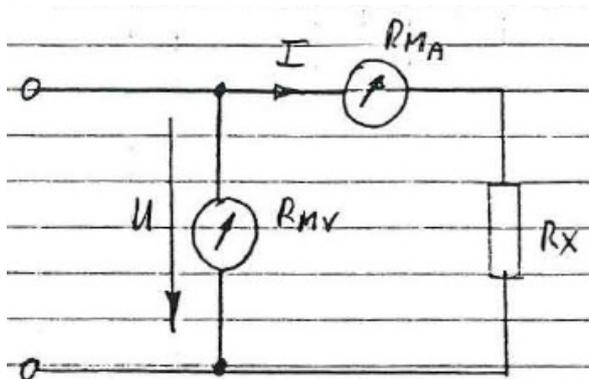
### 1.2.7.5 Korrekturformeln für die indirekte Messung

a) Stromfehlerschaltung (Spannungsrichtige Schaltung)



$$R_X = \frac{1}{\frac{I}{U} - \frac{1}{R_{MV}}}$$

b) Spannungsfehlerschaltung (Stromrichtige Schaltung)



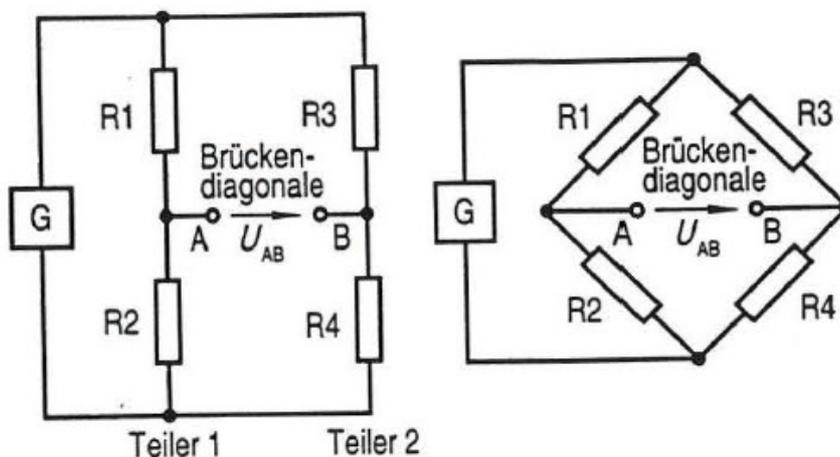
$$R_X = \frac{U}{I} - R_{MA}$$



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	<b>Grundlagen 1.2</b>	18.02.2025

### 1.2.7.6 Brückenschaltungen

Eine Brückenschaltung besteht aus der Parallelschaltung von zwei Spannungsteilern  $R_1, R_2$  und  $R_3, R_4$ .



Beide Spannungsteiler liegen an einer gemeinsamen Spannungsquelle. Die Strecke zwischen den Abgriffpunkten A und B heißt Brückenzweig oder Brückendiagonale; zwischen den beiden Punkten A und B tritt die Brückenspannung auf.

Brückenschaltungen enthalten meist ohmsche Widerstände; bei Verwendung als Messbrücke werden auch Schleifdrähte, sowie temperaturabhängige Widerstände (PTC- und NTC-Widerstände) und Dehnungsmessstreifen (DMS) eingesetzt. Die Skizze zeigt zwei unterschiedliche Darstellungsformen einer Brückenschaltung.

#### 1.2.7.6.1 Brückenspannung

Brückenschaltungen werden meist als Messbrücken eingesetzt; in dieser Form werden sie nach ihrem Erfinder Charles Wheatstone (engl. Physiker, 1802–1875) auch als Wheatstonemessbrücke bezeichnet.



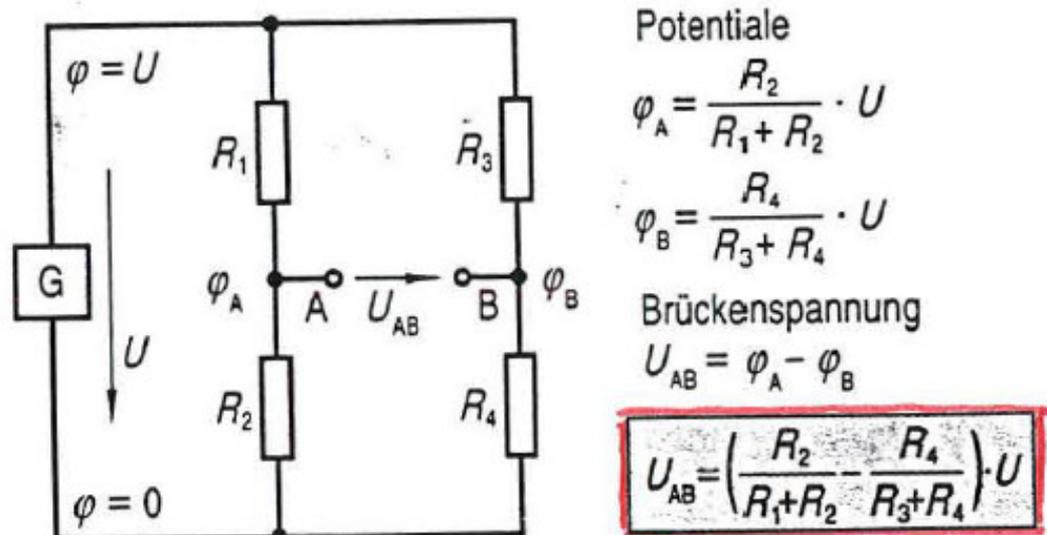
Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

Ist die Brückendiagonale gar nicht oder nur durch ein hochohmiges Spannungsmessgerät belastet, so kann die Brückenspannung leicht mit Hilfe der Maschenregel oder durch eine Potentialbetrachtung berechnet werden.

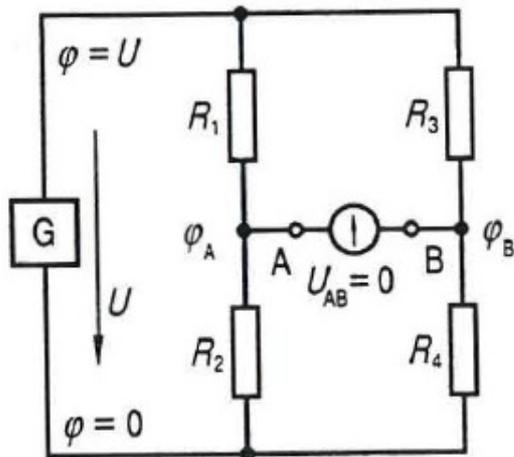
### 1.2.7.6.2 Abgleichbedingung

Messbrücken können als „Ausgangbrücken“ oder als „Abgleichbrücken“ eingesetzt werden.

Bei der Ausgangbrücke wird die Brückenspannung gemessen; sie ist ein Maß für die Messgröße. Bei der Abgleichbrücke wird einer der 4 Widerstände soweit verändert, bis die Brückenspannung Null ist; die Brücke ist dann „abgeglichen“. Die sogenannte Abgleichbedingung erhält man z.B. durch die Berechnung der Potentiale  $\varphi_A$  und  $\varphi_B$ . Die Brückenspannung ist Null, d. h. die Brücke ist abgeglichen, wenn  $\varphi_A = \varphi_B$  ist. Nicht abgeglichene Brücken werden auch als „verstimmt“ bezeichnet.



Unabgeglichene Messbrücke



Abgleichbedingung

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = 0$$

daraus folgt:

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

$$R_2 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_4 = R_1 \cdot R_4 + R_2 \cdot R_4$$

und:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

Vollständiger Abgleich (kompensiert)



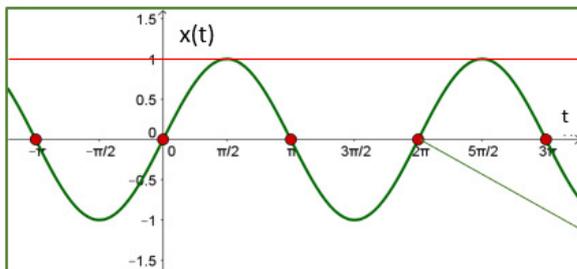


Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

### 1.2.8 Messen von Wechselgrößen

Bisher ging es ausschließlich um die Messung von DC (direct current) Signalen. Wie kann man aber AC (alternating current) Signale messen und was ist dabei zu beachten? Daher sollen zunächst Basisgrößen für Wechsignale vorgestellt werden: Wir gehen zunächst von sinusförmigen Signale aus:

$$x(t) = \sin(\omega t)$$



<https://de.serlo.org/mathe/funktionen/wichtige-funktionstypen-eigenschaften/trigonometrische-funktionen/sinusfunktion-kosinusfunktion>

Scheitelwert:  $\hat{x}$

Gleichwert:  $\bar{x}$  (arithmetischer Mittelwert = zeitlicher Mittelwert)

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$$

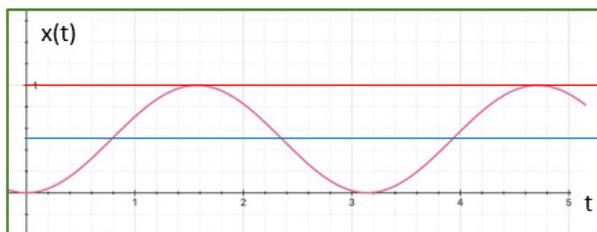
Beispiel:  $x(t) = \sin(\omega t)$

$$\bar{x} = 0$$

Periodendauer T:

$$\text{Kreisfrequenz: } \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

$$x(t) = \sin^2(\omega t)$$



Scheitelwert:  $\hat{x}^2$

Effektivwert:  $x_{eff}$  (RMS: root mean square)

$$x_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

Beispiel:  $x(t) = \sin^2(\omega t)$

$$x_{eff} = \frac{\hat{x}}{\sqrt{2}}$$

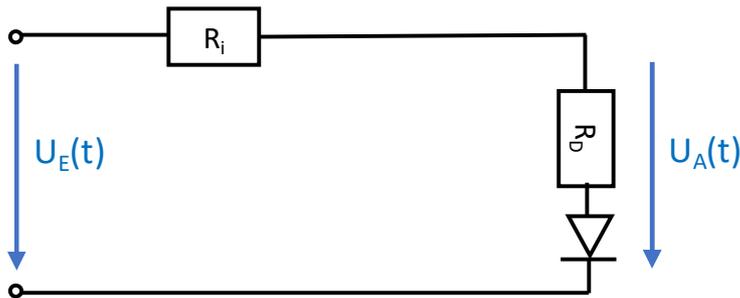
Als Spannung oder Strom bewirken diese Effektivwerte in einem ohm'schen Widerstand den gleichen Energieumsatz in Form von Wärmeenergie, wie die äquivalente Gleichspannung oder Stromstärke.



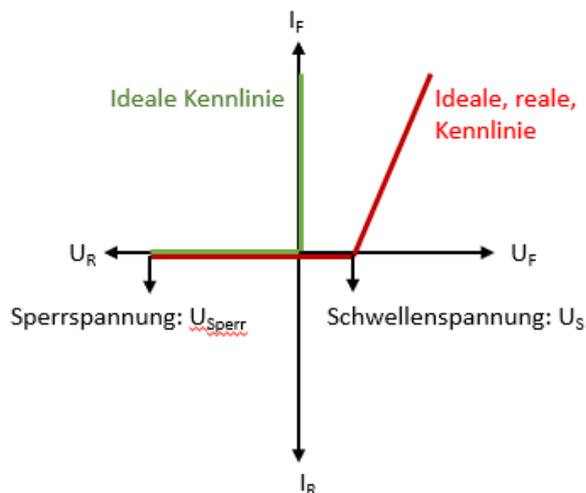
Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

### 1.2.8.1 Gleichrichterdioden

Wie wird ein sinusförmiges Signal durch eine Diode verändert? Hierzu betrachtet man folgendes Ersatzschaltbild:



$R_D$ : Innenwiderstand der (idealen, realen) Diode



Typische Schwellenspannungen:

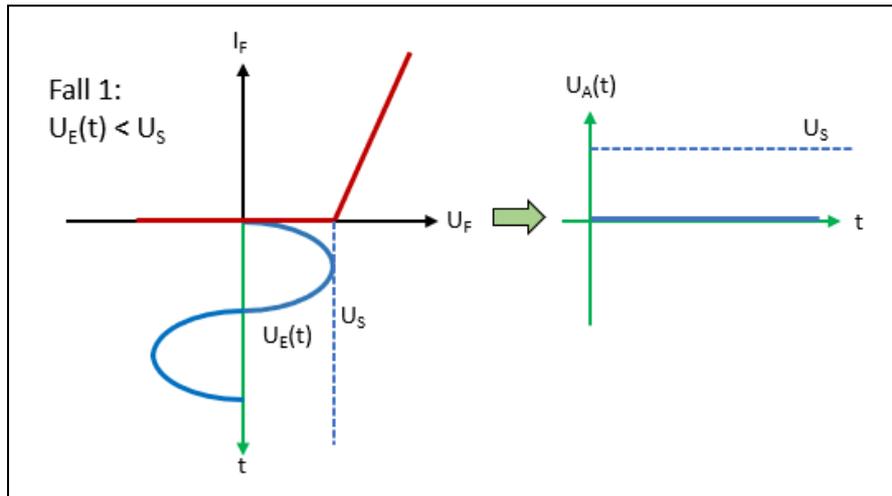
Si:	$U_S = 0,7V \dots 0,3V$
Schottky Diode (Me/HL):	$U_S = 0,2V$
Zenerdiode:	$U_S = 0,7V \dots 0,3V$ ( $U_{Sperr} = -3V \dots -200V$ )



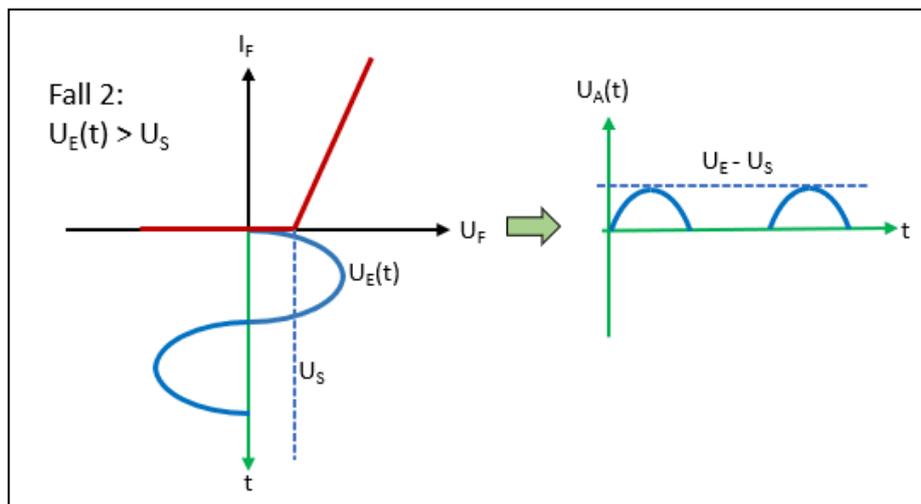
Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

## Ausgangssignal einer Diode

### a) Eingangsspannung < Sperrspannung



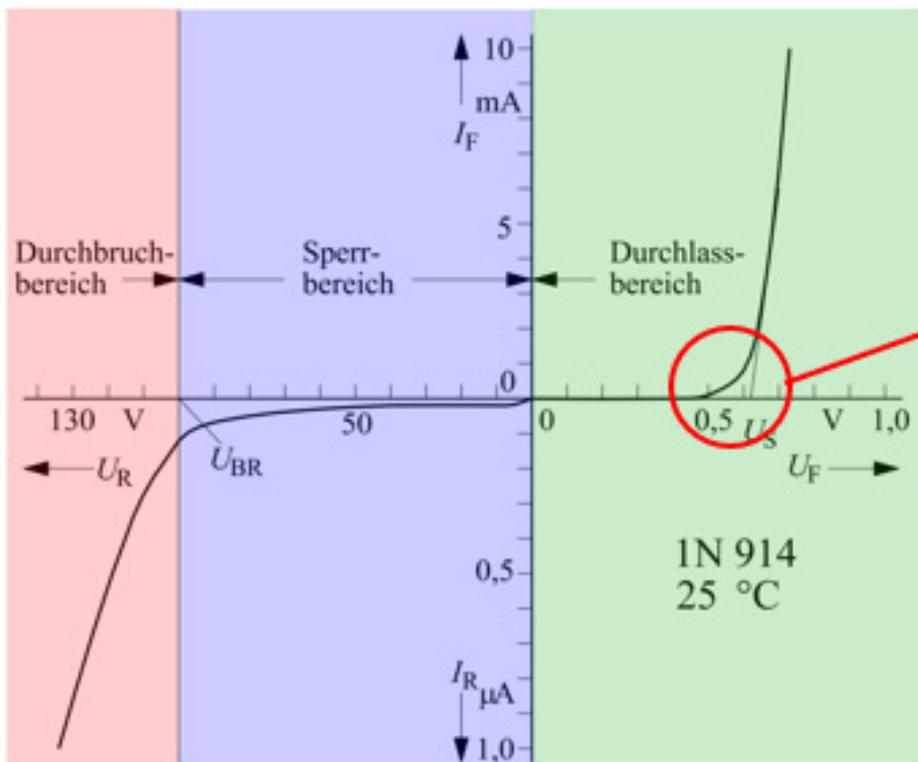
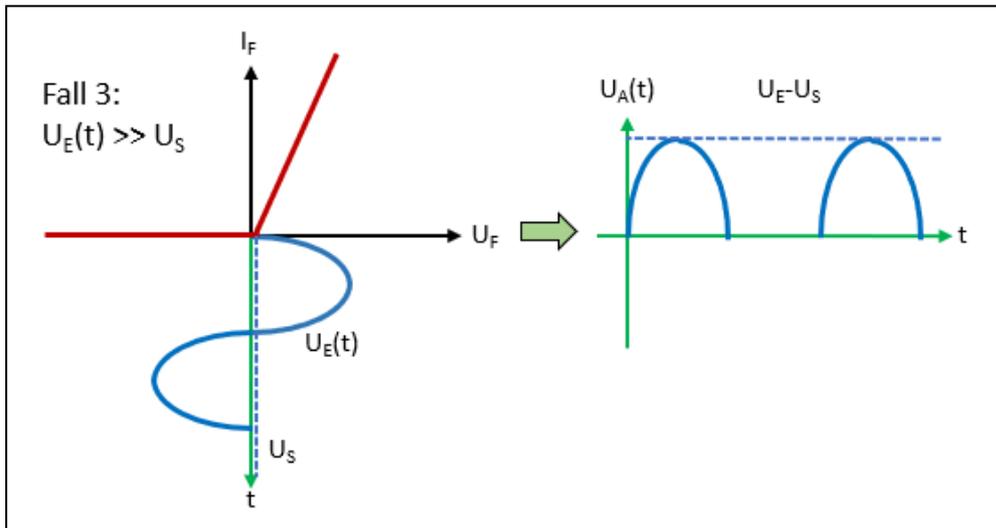
### b) Eingangsspannung > Sperrspannung





Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

c) Eingangsspannung >> Sperrspannung



Reale Kennlinie

Zusätzliche Verzerrungen durch exponentiellen Anstieg im Durchlassbereich



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	<b>Grundlagen 1.2</b>	18.02.2025

### 1.2.8.2 Kenngrößen der Gleichrichtung

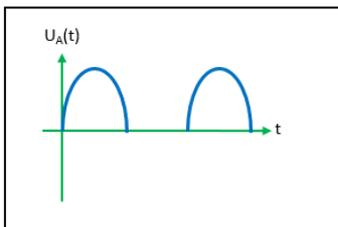
Das Ergebnis der Gleichrichtung ist nicht nur von der Signalstärke abhängig, sondern auch von der Signalform. Dazu wurden **Kennzahlen** definiert, die im folgenden besprochen werden sollen:

#### 1.2.8.2.1 Der Gleichrichtwert

$$x_d = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$$

Der **Gleichrichtwert** (zeitlicher Mittelwert)

*Beispiel: Ein-Weg-Gleichrichtung eines Sinus-Signals*  $x(t) = \hat{x} \sin(\omega t)$

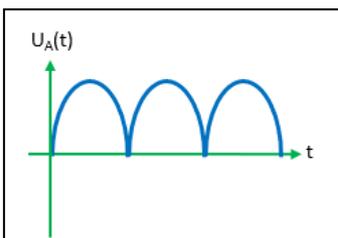


Es gilt:  $x_d = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \hat{x} \sin(\omega t) dt = \left\{ \frac{1}{T} \hat{x} \left[ -\cos(\omega t) \frac{1}{\omega} \right]_0^{\frac{T}{2}} \right\} \Leftrightarrow$  mit  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  folgt:

$$x_d = -\frac{\hat{x}}{T} \frac{T}{2\pi} \left[ \underbrace{\cos\left(\frac{2\pi}{T} \frac{T}{2}\right)}_{-1} - \underbrace{\cos\left(\frac{2\pi}{T} 0\right)}_1 \right]$$

$$x_d = \frac{\hat{x}}{\pi}$$

Handelt es sich um eine 2-Wege-Gleichrichtung folgt entsprechend:



$$x_d = \frac{2\hat{x}}{\pi}$$



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	<b>Grundlagen 1.2</b>	18.02.2025

### 1.2.8.2.2 Der Formfaktor

$$FF = \frac{x_{eff}}{x_d}$$

Der Formfaktor beschreibt das Verhältnis von Effektivwert zu Gleichrichterwert, d.h. der Effektivwert eines Wechselsignals kann (mit dem Formfaktor) aus dem Gleichrichterwert bestimmt werden. Dies ist für Messgeräte von Bedeutung, die bei Wechselgrößen den Effektivwert anzeigen sollen, aber nur der Gleichrichterwert bestimmt werden kann.

Da der Effektivwert immer größer als der Gleichrichterwert ist, kann FF Werte nur zwischen 1 und unendlich annehmen. Damit kann auch die Effizienz der Gleichrichtung angegeben werden.

**Je näher FF an 1 liegt, desto effizienter ist die Gleichrichtung.**

*Beispiel:* Formfaktor einer Sinusschwingung nach 1-Weg Gleichrichtung

$$FF = \frac{\frac{\hat{x}}{\sqrt{2}}}{\frac{\hat{x}}{\pi}} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} = 2,221$$

### 1.2.8.2.3 Der Scheitelfaktor (Crestfaktor)

$$CF = \frac{\hat{x}}{x_{eff}}$$

Der Crestfaktor beschreibt das Verhältnis von Scheitelwert zu Effektivwert. Damit sind die Scheitelwerte (Spitzenwerte) von Strom und Spannung aus gemessenen Effektivwerten bestimmbar.

*Beispiel:* Crestfaktor einer Sinusschwingung

$$CF = \frac{\hat{x}}{\frac{\hat{x}}{\sqrt{2}}} = \sqrt{2}$$



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	<b>Grundlagen 1.2</b>	18.02.2025

Der Crestfaktor beschreibt das Verhältnis von Scheitelwert zu Effektivwert. Damit sind die Scheitelwerte (Spitzenwerte) von Strom und Spannung aus gemessenen Effektivwerten bestimmbar.

Darüber hinaus beschreibt der Crestfaktor den maximal zulässigen Scheitelwert (Spitzenwert) im Verhältnis zum Vollausschlag des jeweiligen Messbereiches bei elektronischen, effektivwertbildenden Messgeräten (z.B. Drehspulinstrument mit Gleichrichter).

Beispiel: CF=2

Gegeben sei ein Messbereich mit  $U_{eff}=10V \Rightarrow$  Es dürfen keine größeren Momentanwerte als  $2 \times 10V = 20V$  gemessen werden. Größere Signale werden verzerrt und führen somit zu Messabweichungen.

Da der Effektivwert nicht größer werden kann als der Scheitelwert ist  $CF > 1!$  D.h. eine Signalform kann mit dem Crestfaktor quantitativ beschrieben werden und gibt damit das Potential für eine Gleichrichtung an. Je näher CF an 1 liegt, desto mehr Signal kann man nach einer Gleichrichtung erwarten.

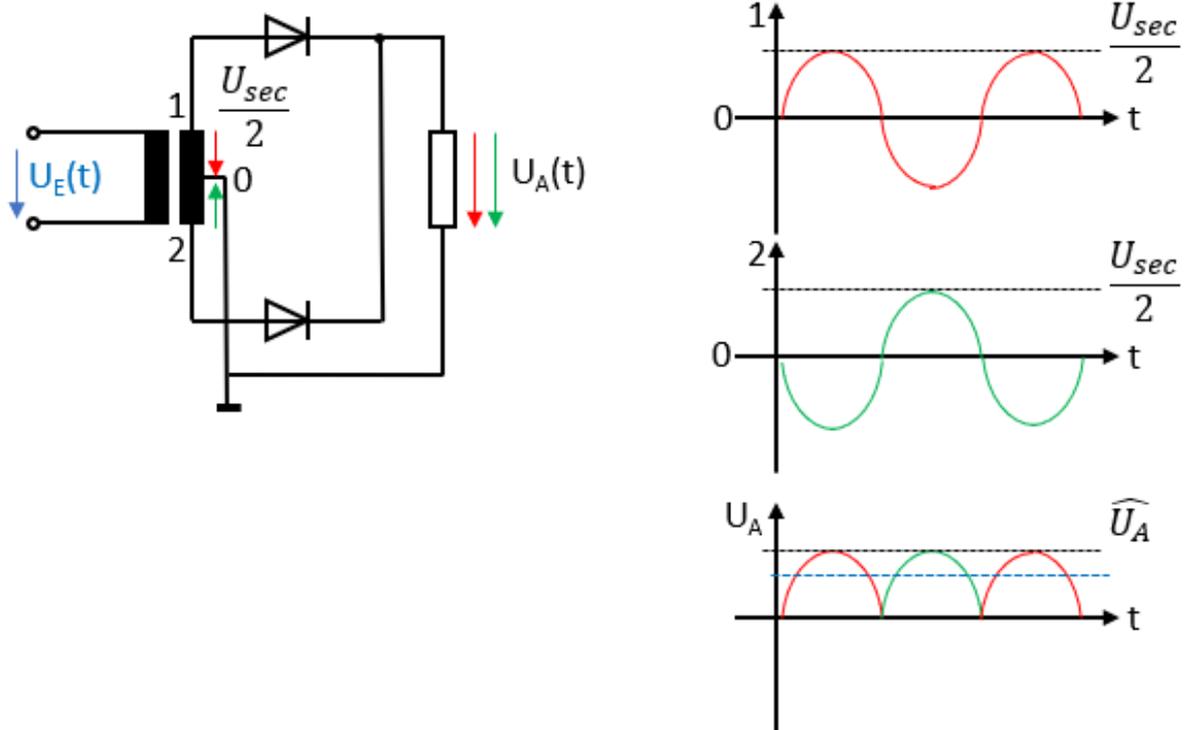
Zusammenfassend ergibt sich für die Kennzahlen gleichgerichteter Signale folgende Übersicht:

Signalform	Diagramm	Beschreibung	Effektivwert	$x_{eff} = \frac{\hat{x}}{\sqrt{2}}$	$x_{eff} = 0,7071 \cdot \hat{x}$
Sinus		Gleichrichterwert	1-Weg: $FF = \frac{\pi}{\sqrt{2}}$	2-Weg: $FF = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}$	1-Weg: $FF = 2,221$ 2-Weg: $FF = 1,111$
		Formfaktor	$CF = \sqrt{2}$		$CF = 1,414$
		Effektivwert	$U_{eff} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{3}}$		$U_{eff} = 0,5773 \cdot \hat{U}$
		Gleichrichterwert	1-Weg: $U_d = \frac{\hat{U}}{4}$	2-Weg: $U_d = \frac{\hat{U}}{2}$	1-Weg: $U_d = 0,25 \cdot \hat{U}$ 2-Weg: $U_d = 0,5 \cdot \hat{U}$
Dreieck		Formfaktor	1-Weg: $FF = \frac{1}{\sqrt{3}}$	2-Weg: $FF = \frac{2}{\sqrt{3}}$	1-Weg: $FF = 0,5773$ 2-Weg: $FF = 1,1547$
		Crestfaktor	$CF = \sqrt{3}$		$CF = 1,7321$
		Effektivwert	$U_{eff} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{3}}$		$U_{eff} = 0,5773 \cdot \hat{U}$
Rechteck		Effektivwert	$U_{eff} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{3}}$		$U_{eff} = 0,5773 \cdot \hat{U}$
		Gleichrichterwert	$U_{eff} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{3}}$		$U_{eff} = 0,5773 \cdot \hat{U}$
		Formfaktor	$U_{eff} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{3}}$		$U_{eff} = 0,5773 \cdot \hat{U}$
		Crestfaktor	$U_{eff} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{3}}$		$U_{eff} = 0,5773 \cdot \hat{U}$

Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

### 1.2.8.3 Schaltungen zur 2-Wege-Gleichrichtung (Mittelwertgleichrichtung):

#### 1) Zweipuls-Mittelpunktschaltung



Für den **Effektivwert** gilt:

$$U_{eff} = \frac{\hat{U}_{1,2}}{\sqrt{2}},$$

sowie für den **Gleichrichterwert**:

$$U_d = \frac{2\hat{U}_A}{\pi}$$

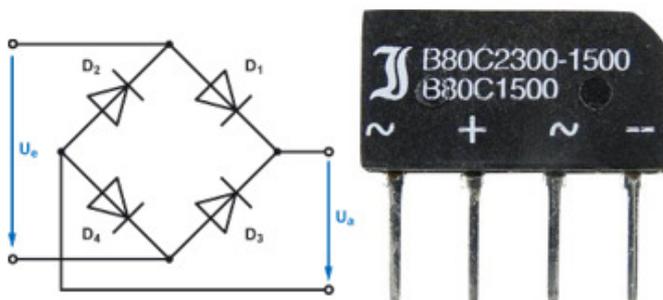
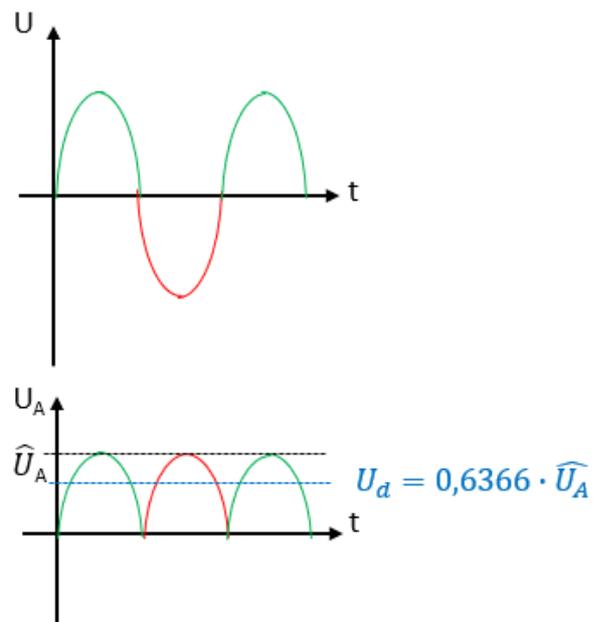
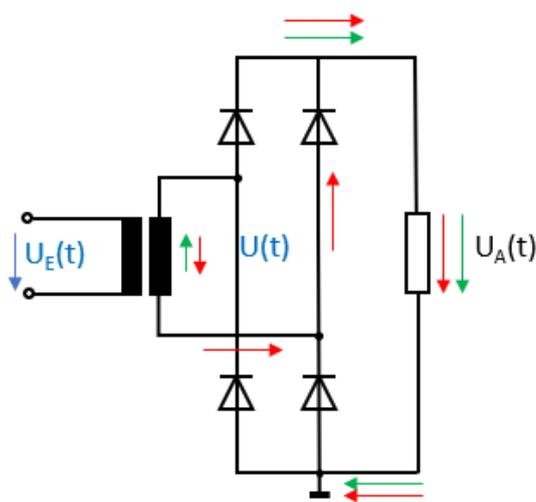
$$U_d = 0,6366 \cdot \hat{U}_A$$



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

### 2) Zweipuls-Brückenschaltung (Brückengleichrichter)

Diese Schaltung wird auch Einphasen-Brückengleichrichterschaltung oder Graetz-Gleichrichterschaltung genannt. Im Gegensatz zur Zweipuls-Mittelpunktschaltung fließt der Strom durch 2 Dioden. Dadurch ist die Ausgangsspannung um den Wert der doppelten Diodendurchlassspannung niedriger.

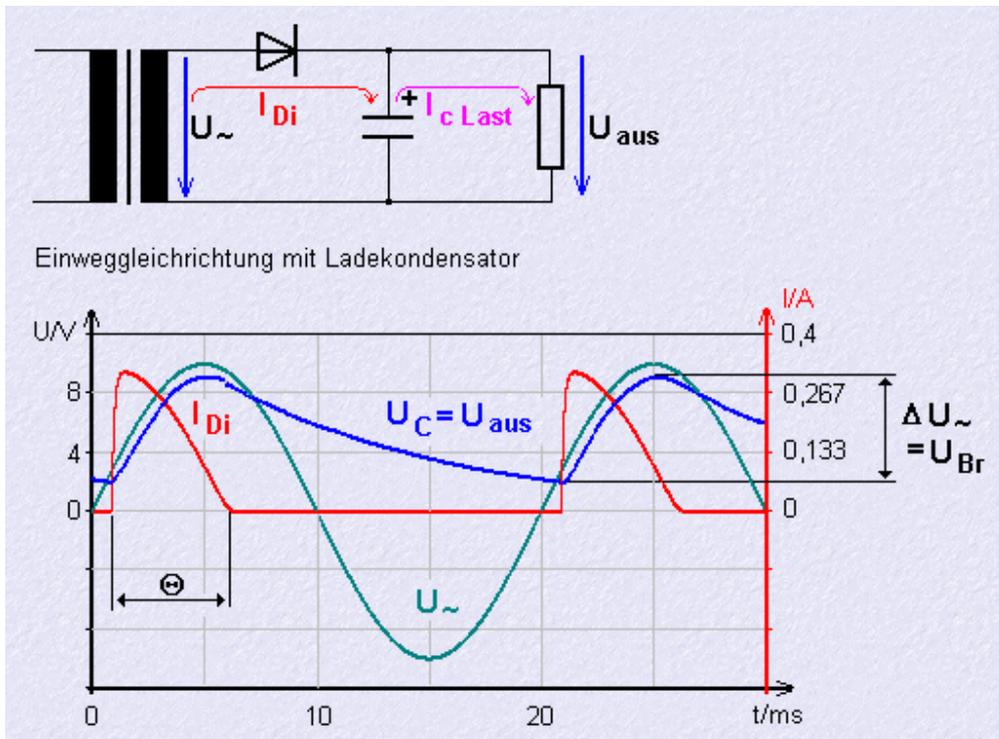


<https://www.elektronik-kompodium.de/sites/slt/1807181.htm>

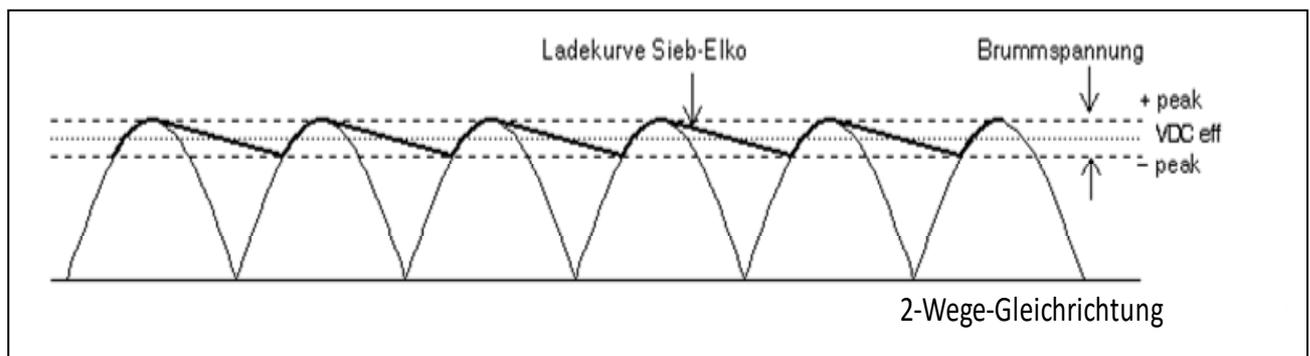


Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

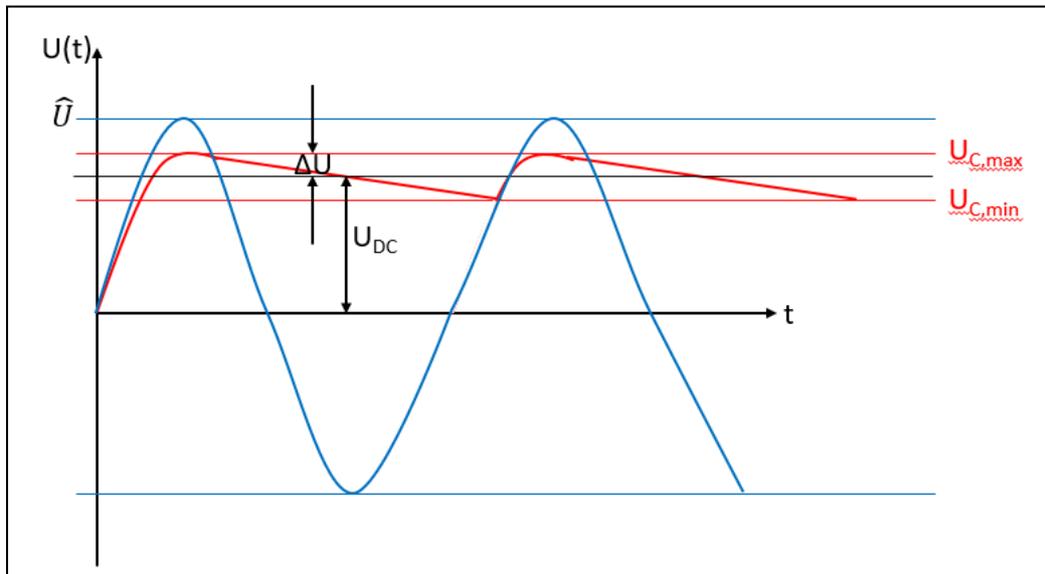
### 1.2.8.4 Spitzenwert-Gleichrichtung (Schaltungsbeispiel):



[[http://elektroniktutor.oszkim.de/analogtechnik/m1\\_glr.html](http://elektroniktutor.oszkim.de/analogtechnik/m1_glr.html)]

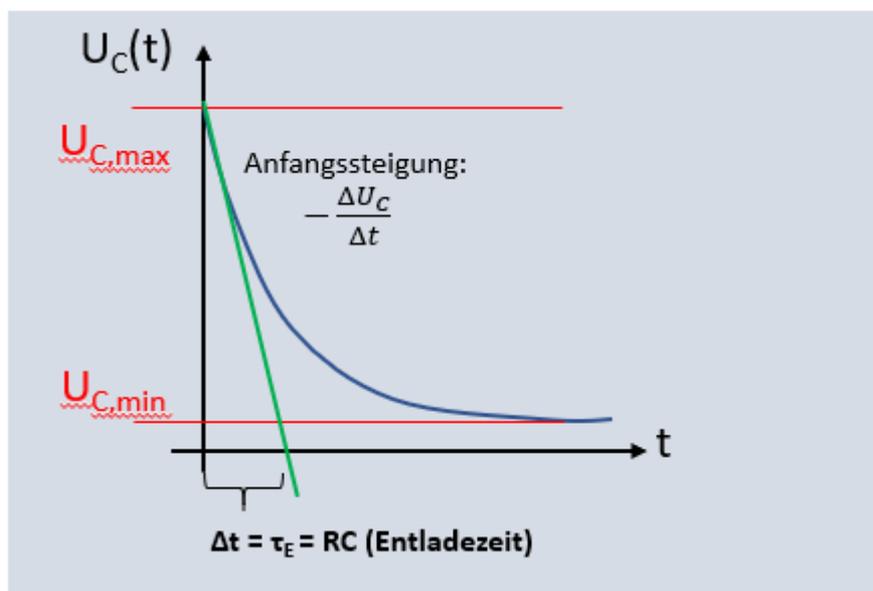


In diesem Fall wird das Entladen von Kondensatoren dazu benutzt, den Spannungsabfall eines Wechselsignals so lang zu verzögern, bis die darauffolgende Halbwelle nahezu denselben Spannungspegel erreicht hat. Zur Beschreibung dieses Vorgangs gehen wir von folgender 1-Weg-Gleichrichtung aus:



Es ist:  $U_{DC} = \frac{U_{C,max} + U_{C,min}}{2}$  und  $\Delta U = \frac{U_{C,max} - U_{C,min}}{2} \Rightarrow U_{C,max} - U_{C,min} = 2\Delta U$

Weiterhin gilt für eine Kondensatorentladung:





Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	<b>Grundlagen 1.2</b>	18.02.2025

Damit ergibt sich für den Spannungsabfall bis zum nächsten Spannungsanstieg:

$$-\frac{\Delta U_C}{\Delta t} = -\frac{2\Delta U}{\Delta t} = -\frac{U_{C,max}}{\tau_E} \quad \text{für } \underline{U_{C,min}} = 0, \text{ also ist}$$

$$\frac{\Delta U}{U_{C,max}} = \frac{\Delta t}{2\tau_E}$$

Mit  $t_1 = 0s$  und  $\tau_E = RC$  folgt:

$$\frac{\Delta U}{U_{C,max}} = \frac{t}{2RC}$$

Mit  $t = \frac{1}{f}$  folgt damit:

$$\varepsilon = \frac{\Delta U}{U_{C,max}} = \frac{1}{2fRC}$$

Glättungsfehler 1-Weg-Gleichrichtung

$$\varepsilon = \frac{\Delta U}{U_{C,max}} = \frac{1}{4fRC}$$

Glättungsfehler 2-Wege-Gleichrichtung

Die Quantität einer Spitzenwertgleichrichtung kann also mit der Kennzahl „Glättungsfehler“ beschrieben werden. Daneben gibt es als weitere Kennzahl den „Glättungsfaktor“ GF (auch: absoluter Stabilisierungsfaktor):

$$GF = \frac{\text{Spannungsänderung am Eingang eines 2-Tor}}{\text{Spannungsänderung am Ausgang eines 2-Tor}}$$

Bezogen auf eine Gleichrichtung bedeutet das

$$GF = \frac{\text{Brummspannung am Eingang}}{\text{Brummspannung am Ausgang}} = \frac{\Delta U_E}{\Delta U_A} = \frac{U_{eff,IN}}{U_{eff,Out}}$$

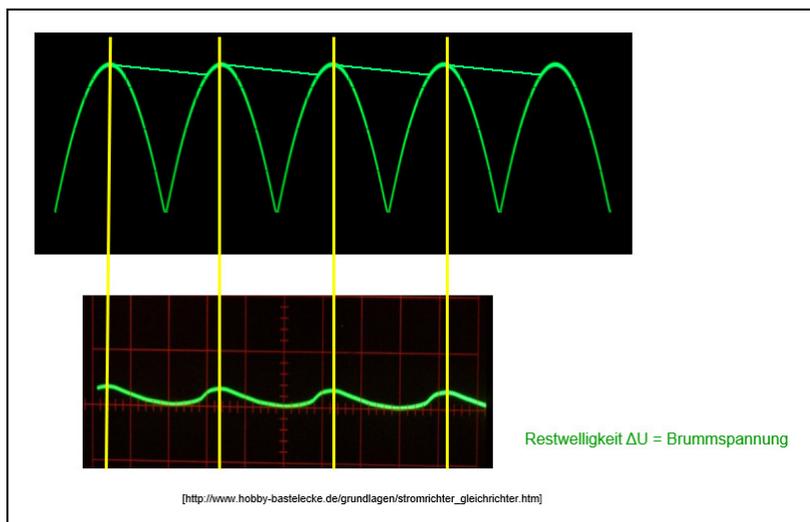
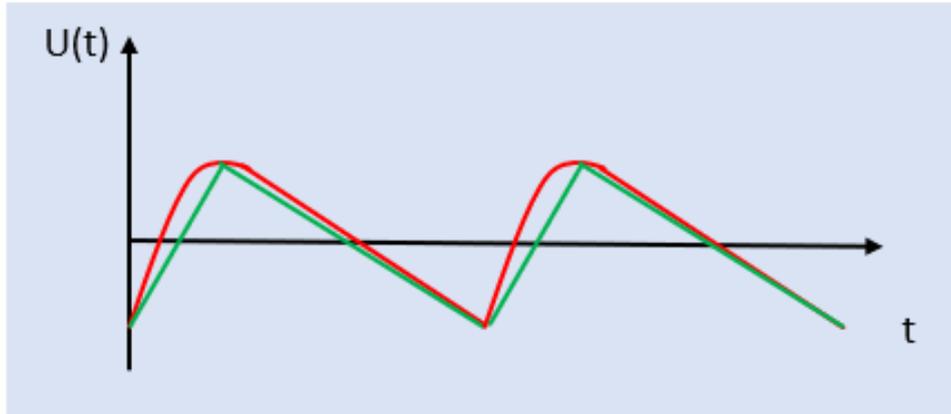
Damit ergibt sich mit  $\Delta U_{eff,IN} = U_{DC}$  und  $\Delta U_{eff,Out} \cong \frac{\Delta U}{\sqrt{3}}$  (Dreieck-Schwingung):

$$GF = \frac{U_{DC}}{\Delta U} \sqrt{3}$$

Gütefaktor für die Spitzenwertgleichrichtung einer Sinus-Wechselspannung



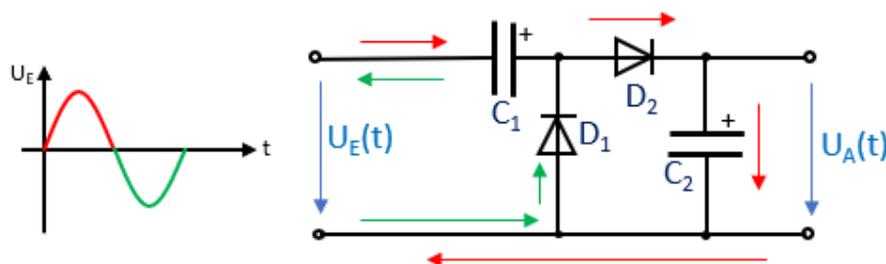
Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025



Spitzenwert-Gleichrichtung  
(Oszillogramme):

#### 1.2.8.4.1 Schaltungen für Spitzenwert-Gleichrichtung:

1) Einpuls-Verdopplerschaltung (Villard-Greinacher Schaltung):



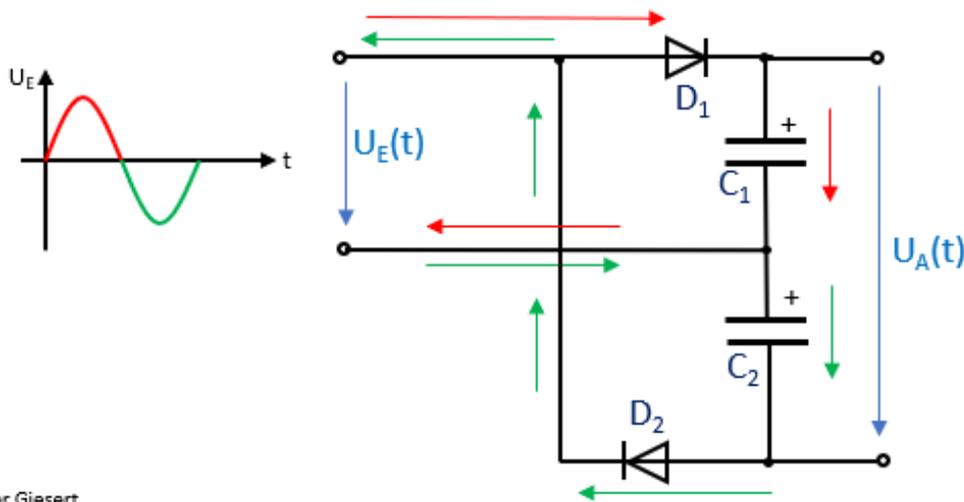


Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

$D_1$  dient als Gleichrichtung, d.h während einer Halbwelle werden die Kondensatoren  $C_1$  und  $C_2$  aufgeladen. Während der nächsten Halbwelle addiert sich der Spannung zur Ausgangsspannung  $U_A(t)$ . Die Diode  $D_2$  verhindert das Entladen von  $C_2$  über  $C_1$  (Entladesperre).

Für die Ausgangsspannung gilt:  $\bar{U}_A \approx 2 \bar{U}_E$

2) Zweipuls-Verdopplerschaltung (nach DIN 41761) / Delon-Schaltung oder Greinacher-Schaltung



© Giesert

$D_1$  erzeugt aus der positiven Halbwelle eine gleichgerichtete Spannung,  $D_2$  aus negativen Halbwelle. Man erhält eine gepulste Gleichspannung, durch die beide Lastkondensatoren abwechselnd fast auf den Scheitelwert der Wechselspannung aufgeladen werden und damit nahezu eine Spannungsverdoppelung bewirken.

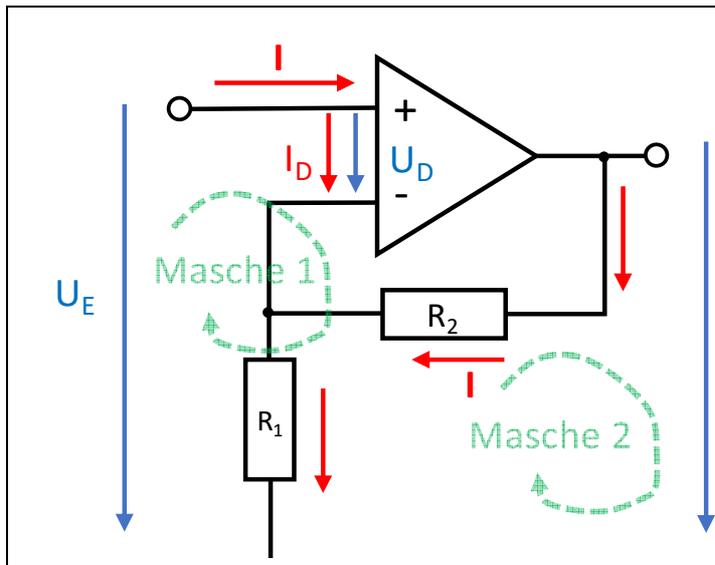
Für die Ausgangsspannung gilt damit :  $\bar{U}_A \approx 2 \bar{U}_E$

**Anwendung beider Schaltungen: In Messgeräten zur Anzeige von Spitze-Spitze-Spannungswerten**



### 1.2.9 Operationsverstärker, Standardschaltungen

#### 1.2.9.1 Der Nicht Invertierer



Es ist  $I_D = 0A$  (sehr hoher Innenwiderstand!). Damit folgt für **Masche 1**:

$$-U_E + U_D + IR_1 = 0 \quad \text{mit } U_D = 0V \quad \text{folgt: } U_E = IR_1$$

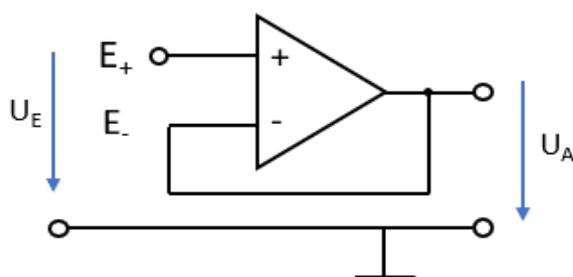
Es folgt für **Masche 2**:

$$U_A - IR_1 - IR_2 = 0 \Rightarrow U_A = I(R_1 + R_2)$$

Damit erhält man die (User)Verstärkung  $V_U$ :  $V_U = \frac{U_A}{U_E} = \frac{I(R_1 + R_2)}{I(R_1)} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$  also:

$$V_U = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$V_U$  kann keine kleineren Werte als 1 annehmen! Für diesen Fall ist entweder  $R_2=0\Omega$  und/oder  $R_1=\infty\Omega$ . Damit erhält man als Sonderfall folgende Schaltung:

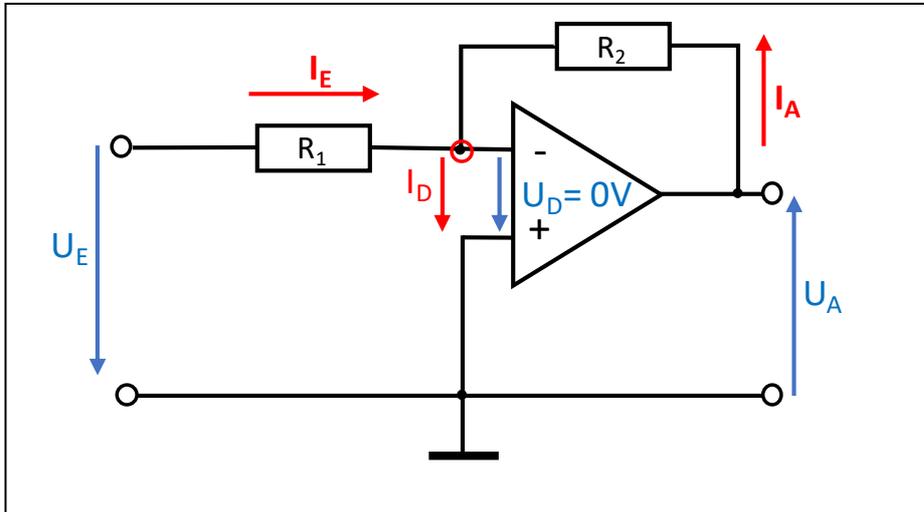


Diese Verschaltung eines Nicht-Invertierers wird auch als:

- **Spannungsfollower**
- **Stromverstärker** oder
- **Impedanzwandler** bezeichnet!

Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	<b>Grundlagen 1.2</b>	18.02.2025

### 1.2.9.2 Der Invertierer

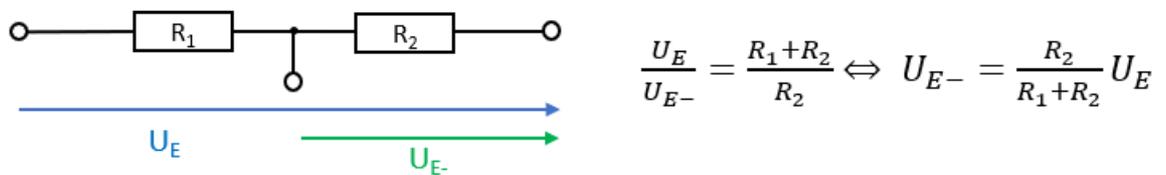


Mit der Inverter Schaltung wird das Eingangssignal invertiert und verstärkt ausgegeben !

**Funktionsweise:** Wie wird das Ausgangssignal  $U_A$  gebildet?

Hierbei wird beispielhaft dargestellt, wie sich das Ausgangssignal  $U_A$  bei einer Eingangsspannung von  $U_E=1V$  mit der Zeit aufbaut. Dabei soll der Verlauf der Spannungsänderung ( $U_{E-}$ ) am Eingang des OPV betrachtet werden.

$U_{E-}$  ergibt sich aus dem Spannungsteiler:



Mit  $R_1=R_2$  folgt:  $U_{E-} = \frac{1}{2} U_E$

Damit folgt für das Zeitverhalten des Inverters:



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

Einstellzeit t	$U_E/V$	$U_A/V$	$U_{E-}/V$	$U_{Ges} =  U_E  +  U_A /V$
$t_1$	1	0	0,5	1
$t_2$	1	-0,1	0,45	1,1
$t_3$	1	-0,2	0,4	1,2
$t_4$	1	-0,3	0,35	1,3
...				
$t_{max}$	1	-1	0	2

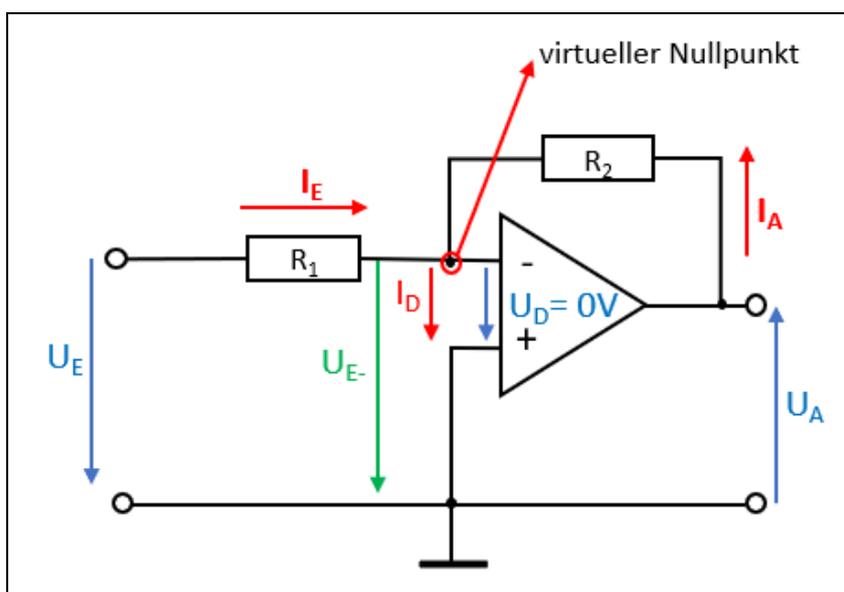
Nach der Einstellzeit  $t_{max}$  hat der E- Eingang des OPV Nullpotential, d.h. er kann als ein **virtueller Nullpunkt** angesehen werden.

Das bedeutet nach der Knotenregel, dass gilt:  $I_E + I_A = 0 \Leftrightarrow I_E = -I_A$

D.h. es gilt:  $I_E = \frac{U_E}{R_1}$  und  $I_A = \frac{U_A}{R_2}$ , weiterhin ist:  $V_U = \frac{U_A}{U_E}$

Für die User-Verstärkung  $V_U$  folgt damit:

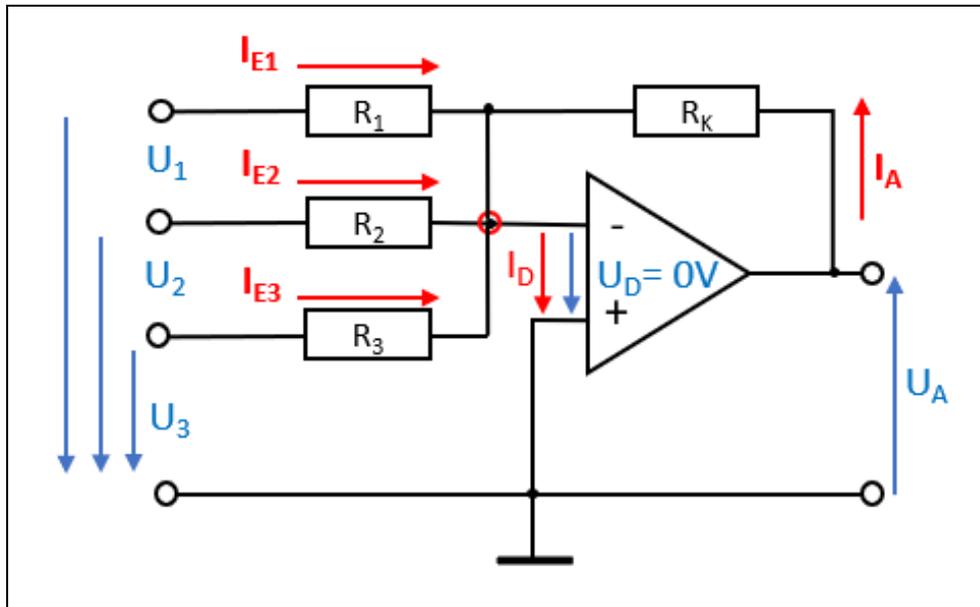
$$V_U = -\frac{R_2}{R_1}$$





Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

### 1.2.9.3 Der Summierer



Der Strom  $I_D$  zwischen den Differenzeingängen ist, wegen des hohen Innenwiderstandes, nah gleich Null.

D.h. es gilt am **virtuellen Nullpunkt**:  $I_{E1} + I_{E2} + I_{E3} = -I_A$

Damit ergibt sich für die Ausgangsspannung  $U_A$ :

$$\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3} = -\frac{U_A}{R_K} \Leftrightarrow U_A = -\left(U_1 \frac{R_K}{R_1} + U_2 \frac{R_K}{R_2} + U_3 \frac{R_K}{R_3}\right)$$

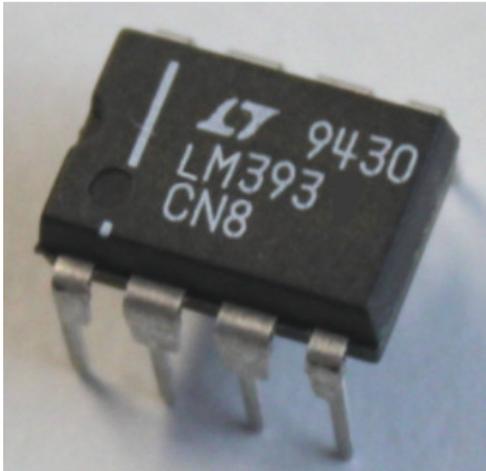
Für  $R_1=R_2=R_3=R_K$  folgt:

$$U_A = -(U_1 + U_2 + U_3)$$

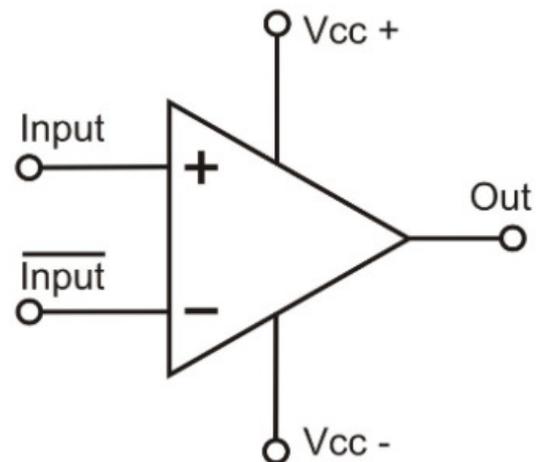
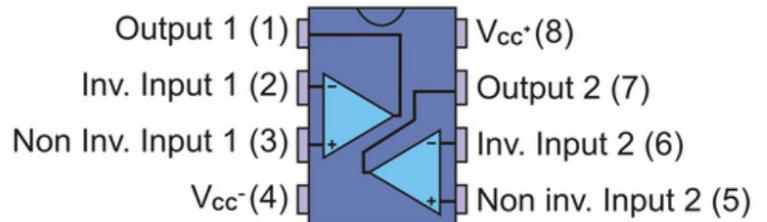


Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

### 1.2.9.4 Der Komparator



LM 393 mit 2 Komperatoren (Quelle: [www. Conrad.de](http://www.conrad.de))



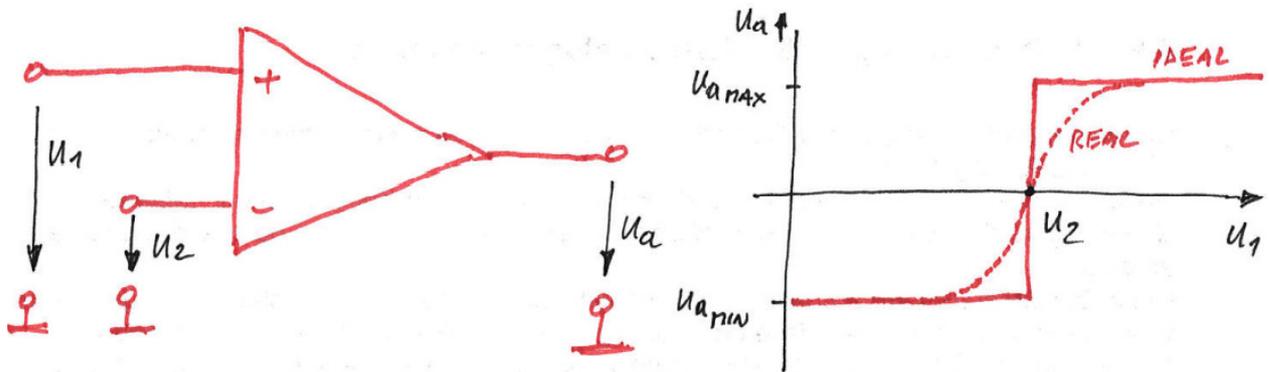
Ein Komparator ist ein abgespeckter Operationsverstärker, dessen wesentliche Aufgabe der Vergleich von 2 Messwerten ist. Der schaltungstechnische Fokus liegt auf der Geschwindigkeit (Slew rate) des Komparators und nicht auf der Qualität in der Verstärkung.

Ein Komparator ist im Grunde ein Vergleicher. Ebenso wie ein OPV besitzt ein Komparator zwei Eingänge. Ein Eingang ist invertiert und wird mit einem Minuszeichen (-) gekennzeichnet. Der andere Eingang ist nicht invertiert und wird mit einem Pluszeichen (+) gekennzeichnet.

Je nachdem, welcher Eingang das höhere Spannungspotential aufweist, wird der Ausgang des Komparators umgeschaltet. Deshalb kann ein Komparator auch als 1 Bit Analog-Digital-Wandler angesehen werden.



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025



$$\text{SLEW-RATE} = \frac{\Delta U}{\Delta t} \left[ \frac{\text{V}}{\text{ms}} \right]$$
$$\left[ \text{STANDARD OP CO} \frac{1\text{V}}{\text{ms}} \right]$$

$U_{a\max}$  für  $U_1 > U_2$   
 $U_{a\min}$  für  $U_1 < U_2$

### Die „Slew Rate“ (SR)

Die Slew Rate, auch: **Spannungsanstiegsrate** oder: **Großsignalaussteuerung**, kennzeichnet die maximal mögliche zeitliche Spannungsänderung am Ausgang eines OPV. Hierbei wird der Verstärker bis an die Übersteuerungsgrenze und sogar bis in den Sättigungsbereich hinein betrieben. Das Ausgangssignal bleibt dabei noch unverzerrt.

Typische Werte für die Slew rate sind:

- Standard-OPV:  
-> SR= 0,1 V/ $\mu$ s bis 10 V/ $\mu$ s
- Highspeed OPV:  
-> SR= 10 V/ $\mu$ s bis 5000 V/ $\mu$ s



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	<b>Grundlagen 1.2</b>	18.02.2025

### 1.2.10 Analog-Digital- / Digital-Analog-Wandlung

Wozu benötigt man AD/DA Wandler ?

In der elektrischen Messtechnik werden sehr oft analoge Größen wie z.B. Spannung, Widerstand, Temperatur, Gewicht usw. gemessen. Die anfallenden Messdaten werden dann aber oft in digitaler Form zur Weiterverarbeitung benötigt. Dies ist z.B. dann der Fall, wenn Sie mit Computern veranschaulicht, gespeichert oder übertragen werden sollen. Um diese analogen Größen in einem Zahlenwert zu wandeln benötigt man Analog-Digital-Wandler.

Werden allerdings mit digitalen Steuerungen z.B. Computer, SPS usw. Maschinen gesteuert (Drehzahlregelung) so benötigt man Digital-Analog-Wandler, die die errechneten Zahlenwerte in eine analoge Spannung umsetzen.

Folgende Begrifflichkeiten sind in der Technik gleichbedeutend:

ADU (Analog-Digital-Umsetzer)

DAU (Digital-Analog-Umsetzer)

ADC (Analog-Digital-Converter)

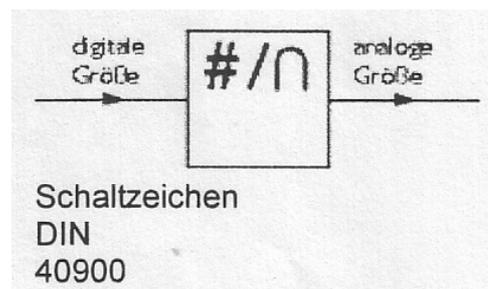
DAC (Digital-Analog-Converter)

AD (Analog-Digital-Wandler)

DA (Digital-Analog-Wandler)

#### 1.2.10.1 Digital-Analog-Wandler

Zum Steuern analoger Regelkreise mit digitalen Steuerungen, oder Meßsystemen müssen die digitalen Daten in analoge Größen, meist Spannung umgesetzt werden. Dies ist die Aufgabe der Digital-Analog-Wandler.



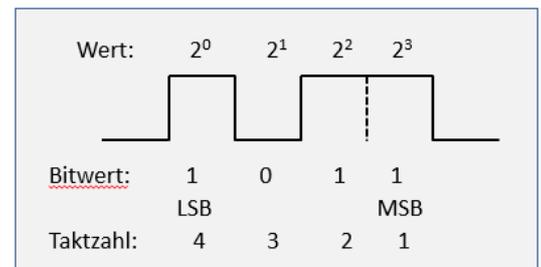


Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

Aus einem binär kodierten Signal muss ein Analogsignal rekonstruiert werden. Die jeweiligen Bitfolgen müssen an einen DAU übertragen werden. Dies kann auf zweierlei Arten geschehen:

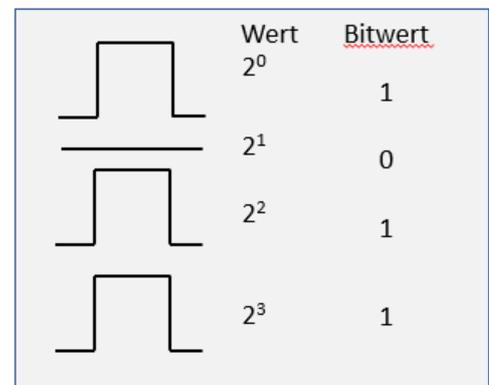
- 1) Serielle Übertragung (meist über große Entfernungen: Fernübertragung)

**Bsp.** Übertragung der Dezimalzahl „13“:

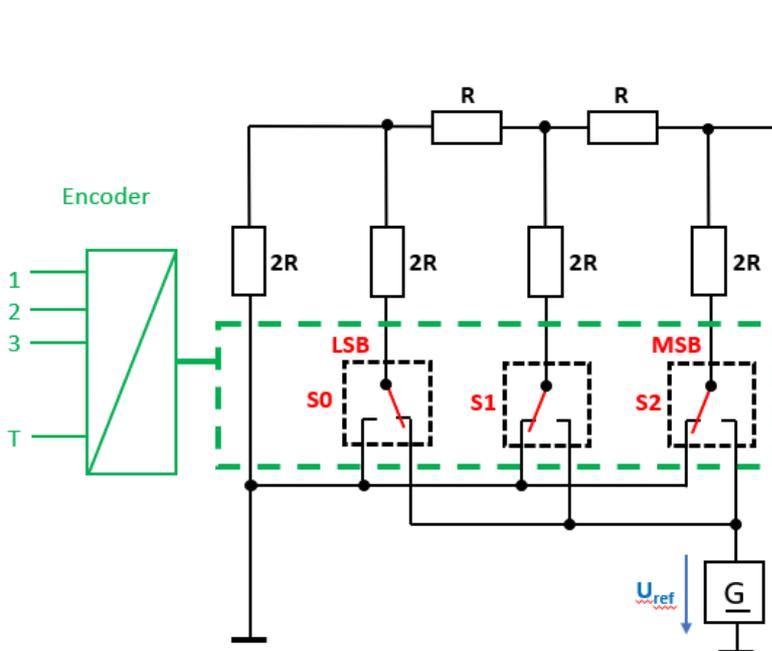


- 2) Parallele Übertragung (meist im Gerät oder zwischen benachbarten Geräten)

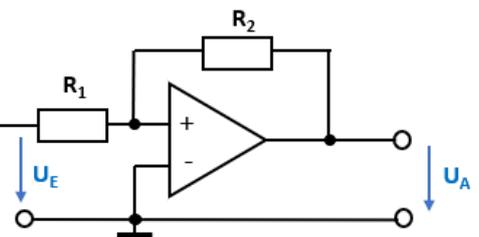
**Bsp.** Übertragung der Dezimalzahl „13“:



### Beispiel: 3-bit-DAU



Verstärker (nicht invertierend)



Beispielkodierung

LSB		MSB
1	0	0
S0	S1	S2
$U_{ref}$	0V	0V



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

Digital-Analog-Wandlung durch Addition von Teilströmen

**0 EINFACHER AUFBAU**  
**0 DIE WIDERSTÄNDE MÜSSEN SEHR GENAU SEIN**  
**0 KEINE OPTIMALE LINEARITÄT, DA DIE LAST GEGEN ÜBER DEM EINGANGS-SIGNAL NICHT KONST. IST.**

BEWUTZUNG EINES R-2R NETZWERKES

**0 DIE REFERENZSPANNUNG WIRD IMMER GLEICH BELASTET**  
**0 ES SIND IMMER NUR 2 SORTEN WIDERSTÄNDE FÜR DAS R-2R NETZWERK NOTWENDIG. DIESE NETZWERKE GIBT ES AUCH ALS KOMPAKTES BAUELEMENT**



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

Eine wichtige Größe eines D/A-Wandlers ist die Auflösung. Sie gibt an wie viel Stufen die maximale Ausgangsspannung eingeteilt ist. Je größer die Auflösung, desto genauer kann der Eingangswert in die Ausgangsspannung gewandelt werden.

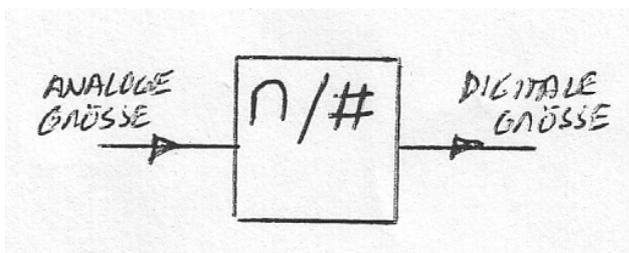
### Beispiel:

Ein acht Bit D/A-Wandler kann am Ausgang maximal 5V liefern. Wie groß ist die Auflösung des Wandlers?

Lösung: Acht Bit entspricht 256 Zahlenwerte von 0-255 Auflösung =  $5V / 255 = 20mV$

### 1.2.10.2 Analog-Digital-Wandler

Sollen analoge Messgrößen weiterverarbeitet werden, so kann man dies mit analogen Rechnerschaltungen realisieren. Die Entwicklung der Digitaltechnik und der damit verbundenen Realisierung von Analog-Digital-Wandlerschaltungen, konnte dieser Vorgang doch wesentlich vereinfacht werden. Ohne diese Technologie wären die Erfolge in der EMSR-Technik und der damit verbundenen Prozess- bzw. Fertigungsoptimierung, nicht realisierbar gewesen.



Überall dort wo analoge Größen mit digitalen Geräten zu verarbeiten sind, kommt der D/A-Wandler zum Einsatz. Dabei unterscheidet man zwei Gruppen:

- Momentanwert Umsetzer
- Integrierende Umsetzer



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	<b>Grundlagen 1.2</b>	18.02.2025

Bei den Momentanwert-Umsetzern wird während eines bestimmten Zeitpunktes der Spannungswert am Eingang in einen digitalen Wert umgewandelt, während bei den Integrierenden Umsetzern der mittlere Wert einer analogen Spannung in einem bestimmten Zeitabschnitt gebildet wird, und dieser Wert in eine digitale Form gebracht wird.

Weiterer Unterschied der beiden Gruppen besteht in der Wandlungszeit. Die Momentanwert-Umsetzer sind schneller, da sie nicht einen Zeitabschnitt warten müssen um dann den Mittelwert digital umzuformen. Allerdings haben die integrierenden Wandler den Vorteil, dass sie nicht so empfindlich gegen Spannungsspitzen am Eingang sind. So kann eine ungewollte Spannungsspitze gerade auftreten, wenn eine Messung abläuft und das Messergebnis ist um ein Vielfaches verfälscht.

Der Wunsch, analog erzeugte Daten digital weiter zu verarbeiten, zu speichern oder zu übertragen, hat zur Entwicklung vieler verschiedener Verfahren zur Analog-Digital-Wandlung geführt.

Drei davon, nämlich das Zweirampenverfahren (Dual Slope), das Verfahren nach der sukzessiven Approximation und das Parallel Verfahren haben sich im Wesentlichen durchgesetzt und wurden zu hoher Reife entwickelt. Das 4. Verfahren, das Delta-Sigma-Verfahren erfreut sich auch einer hohen Akzeptanz, auch aufgrund der Weiterentwicklungen in der Halbleitertechnologie.

Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht der wichtigsten ADU. Alle AD-Wandler können nur Gleichspannungen oder Spannungen umsetzen, die sich während der Messung nicht verändern! Es werden vorgeschaltete Sample and Hold - Glieder benötigt.



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	<b>Grundlagen 1.2</b>	18.02.2025

Arbeitsprinzip	Genauigkeit, Schnelligkeit	Preis, Stromverbrauch	Ausgang	Anwendungsbeispiel
integrierender AD-Wandler, Zweirampenverfahren	dezimal: 3½ bis 5½ Stellen binär: 12 bis 20 Bit, 10 ms bis 1 s, langsam	sehr preisgünstig, 1 mW bis 100 mW	BCD mit Ziffernanzeige, binär, parallel, µP-kompatible Busschnittstelle	Digitalmultimeter, langsame Spannungsmesser, für manuelle und automatische Messungen; unempfindlich gegen überlagerte Störungen
AD-Wandler nach dem Prinzip der sukzessiven Approximation	binär, 8 bis 18 Bit, 0,5 µs bis 100 µs, schnell	preisgünstig bis mittlere Preisklasse, 0,1 W bis 1 W	binär, zunehmend µP-kompatible Busschnittstelle parallel und seriell	schneller Datenwandler in der industriellen Steuer- und Regeltechnik, zur Kommuni- kation und zur Überwachung schneller Vorgänge; störemmpfindlich
AD-Parallelwandler, ein- und zweistufig	binär, 6 bis 12 Bit, 2 ns bis 200 ns, sehr schnell	mittlere bis hohe Preisklasse, 1 W bis 4 W	binär, parallel	Datenwandler für Oszillo- skope, Transientenrecorder, zur Digitalisierung von Videosignalen, Kommuni- kationstechnik, Überwachungs- technik (Radar)
Delta-Sigma-AD-Wandler	8 bis 16 Bit, 2 µs bis 1 s	günstig bei großen Stückzahlen, Verbrauch gering	binär, seriell und parallel	Datenwandler in der Kom- munikationstechnik mit digi- talem Filter für besondere Anwendungsfälle

① ZÄHLVERFAHREN (LEVEL AT TIME)  
INTEGRIERENDE UMSETZER

② WÄGEVERFAHREN (DIGIT AT TIME)

③ PARALLELVERFAHREN (WORD AT TIME)  
MOMENTANWERTUMSETZER

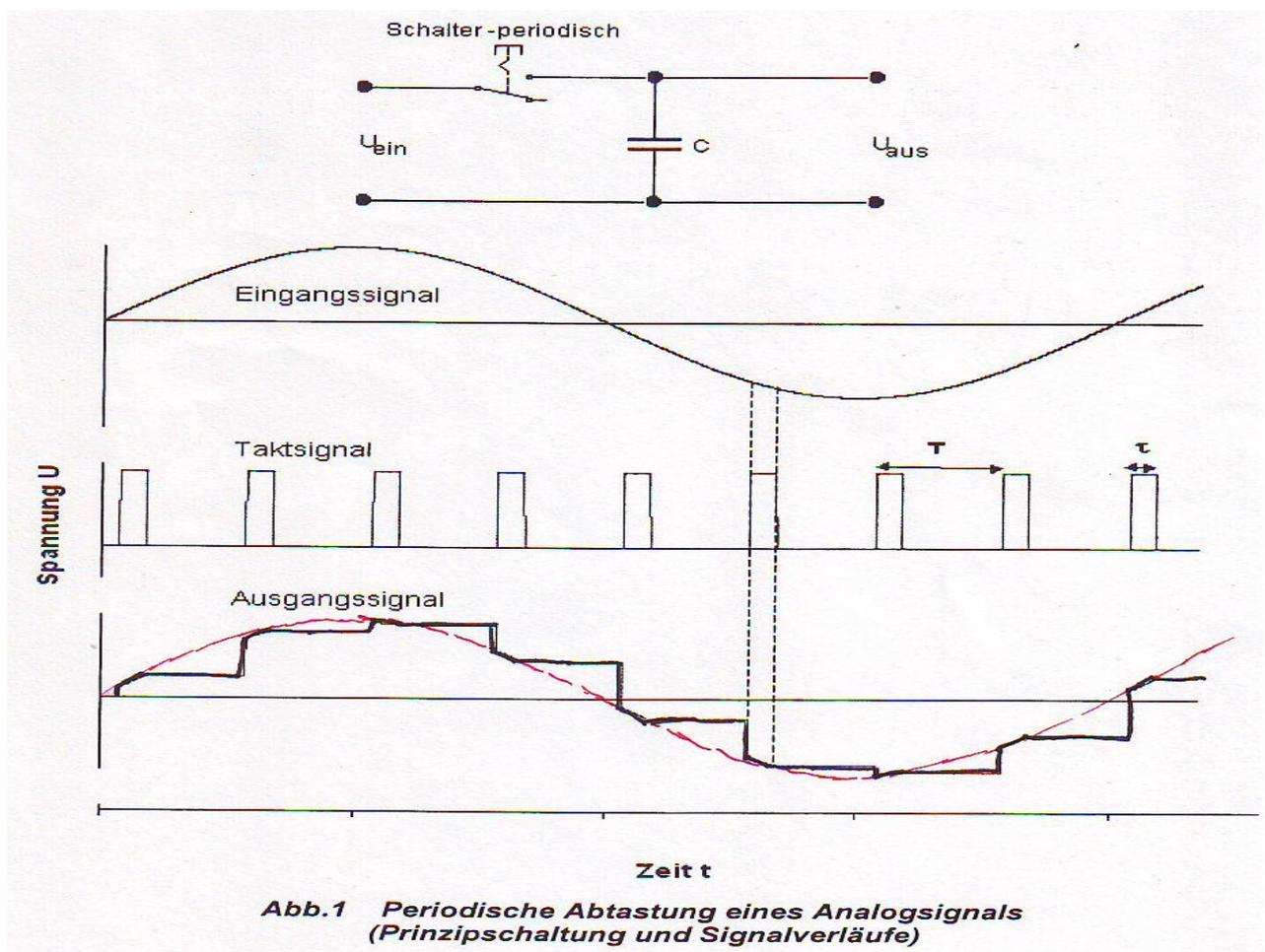


Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

### 1.2.10.3 Abtastung (Sampling) von Analogsignalen

Da sich analoge Messwerte während der Wandlung u.U. schnell verändern können, ist es für die Zeitdauer des Wandlungsvorganges für die Genauigkeit und letzten Endes für das Ergebnis besonders wichtig, dass sich die Werte nicht ändern. Daher geht man ganz allgemein von einem zeitlich veränderlichen (aber nicht notwendig harmonischen bzw. periodischen) Signalverlauf aus.

Ein grundlegendes Prinzip digitaler Signalverarbeitung ist die sogenannte Abtastung (Sampling) von analogen Signalen.

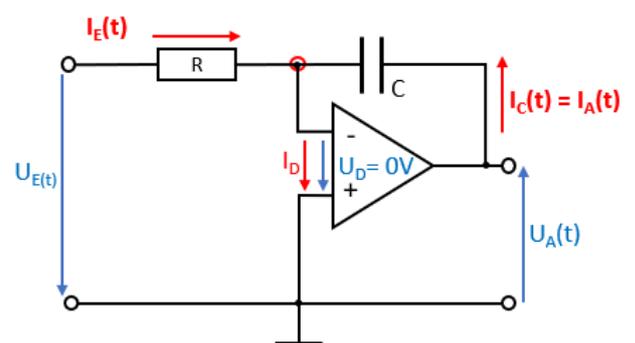
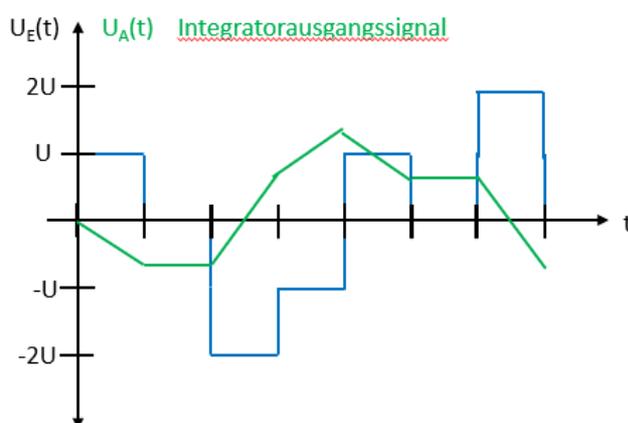




Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

Der (symbolisch gezeichnete) Schalter in Abb.1(a) wird zeitlich periodisch (Abtastperiode  $T$ ) entsprechend einem Taktsignal geschlossen. Die Zeit des "Schließens" (Abtastzeit  $\tau$  „tau“) ist relativ kurz, die dabei "abgetastete" (*sample*) Spannung wird mit dem Kondensator  $C$  gespeichert bzw. "gehalten" (*hold*). Damit wird die übliche Bezeichnung "sample-and-hold- (Abtast- und Halte-) Schaltung" verständlich. Natürlich setzt man normalerweise einen entsprechenden Anlogschalter ein (MOSFET-Schalter, Speicherkondensator, Pufferverstärker), für Details entsprechender Schaltungen muß auf die Literatur verwiesen werden.

In den Zwischenzeiten außerhalb der eigentlichen Abtastung, d.h. während der Haltezeit, entspricht die Spannung am Speicherkondensator nur zu Beginn dem vorher abgetasteten Wert. – es erfolgt immer eine Entladung (in Abb.1b nicht dargestellt). Während der Haltezeit wird die Spannung in den Eingang des eigentlichen ADC eingespeist, der eine  $N$ -Bit- Binärzahl proportional zum vorher abgetasteten Wert liefern soll. Die dafür erforderliche sog. Umsetzzeit ist eine kritische charakteristische Größe, sie sollte natürlich möglichst klein gegen die Entladungszeitkonstante (und die Haltezeit) sein.



Das Analogsignal wird so schnell abgetastet, dass es sich im Integrationszeitraum hinreichend wenig ändert. Wie schnell darf die Abtastung sein, damit der Integrator ein verwertbares Ausgangssignal liefert? → Übertragungsfunktion  $G(j\omega)$  :



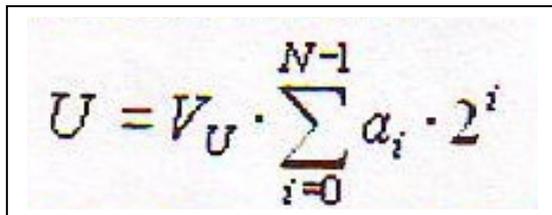
Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

$$\underline{G}(j\omega) = \frac{U_A}{U_E} = -\frac{X_C}{R} \Rightarrow \underline{G}(j\omega) = -\frac{1}{j\omega C R} = -\frac{1}{j\omega RC} = -\frac{K_I}{j\omega}$$

D.h. je größer die Abtastfrequenz, umso kleiner wird das Ausgangssignal.

### 1.2.10.4 Signalquantisierung

Jeder Digitalwert, der (mit einem DAC) in eine Spannung umgewandelt werden soll, kann als Summe der einzelnen Binärstellen ausgedrückt werden:


$$U = V_U \cdot \sum_{i=0}^{N-1} a_i \cdot 2^i$$

$V_U$  = VERSTÄRKUNGSFAKTOR DER WANDLUNG  
 $\sum$  = BESCHREIBT EINE BINÄRZAHL MIT N-BIT  
 $i$  = BINÄRE STELLE  
 $a_i$  = i BIT  
 $a_{N-1}$  = MSB (MOST SIGNIFICANT BIT)  
 $a_0$  = LSB (LEAST SIGNIFICANT BIT)

Diese Beziehung gilt auch für den umgekehrten Fall einer AD-Wandlung. Die Summe beschreibt hier eine Binärzahl mit insgesamt  $N$  Bit, der Index  $i$  die binäre Stelle und  $a_i$  das  $i$ . Bit, wobei dann  $a_i = 1$  ein gesetztes Bit und  $a_i = 0$  ein nicht gesetztes Bit bedeutet. Das Bit  $a_{N-1}$  ist das höchstwertige (Most Significant Bit, MSB) und  $a_0$  das niedrigstwertige (Least Significant Bit, LSB). Der konstante Faktor  $V_U$  ist der Verstärkungsfaktor der Wandlung.

Offensichtlich kann die Spannung nur endlich viele ( $N$ ) und diskrete Werte annehmen, d.h. ein Kontinuum von Analog-Werten wird durch eine begrenzte Wertezahl approximiert. Die Güte dieser diskreten Approximation hängt von der Bitanzahl  $N$  des Binärwortes (der Auflösung des Wandlers) ab.



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	<b>Grundlagen 1.2</b>	18.02.2025

Nehmen wir als einfaches Rechenbeispiel einen DAC mit 4 Bit Auflösung an, der in unipolarer Betriebsart Ausgangs- Spannungen von 0 bis 10 V liefern soll:

Er kann insgesamt  $2^4 = 16$  Spannungswerte zwischen 0 V (für binär 0000 bzw. dezimal 0) und 10 V (für binär 1111 bzw. dezimal 15) ausgeben – mit einer diskreten Schrittweite von  $2/3$  V ( $10 \text{ V}/15$ ).

\*Anmerkung: Die Begriffe "Quantisierung" bzw. "Diskretisierung" sind synonym in Gebrauch.

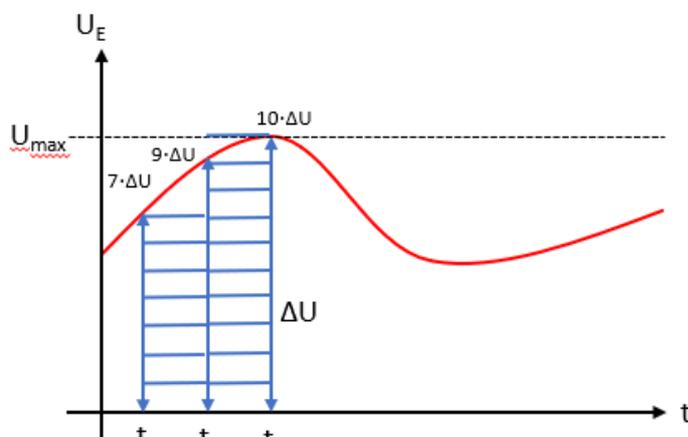


Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	<b>Grundlagen 1.2</b>	18.02.2025

### 1.2.10.5 Verfahren zur Analog-Digital-Wandlung

Ein analoges Signal (i.A. Spannung) wird quantisiert, d.h. in die Summe gleicher Teile (Inkmente) zerlegt. D.h. der Messwert wird eine Anzahl gleich großer Abschnitte (Messquanten) zerlegt. Man unterscheidet 2 Arten der Quantisierung:

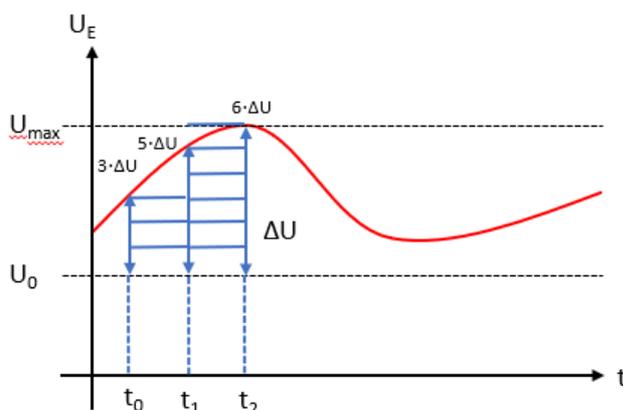
#### a) Momentanwertquantisierung (absolute Quantisierung)



Das Analogsignal wird zu den Zeiten  $t_0, t_1, \dots, t_N$  abgetastet und zu diesen Zeitpunkten in eine ganze Zahl umgewandelt (Integerwert). Dieser Integerwert wird dezimal bzw. hexadezimal dargestellt und kann damit digital verarbeitet werden. D.h.:

$$\text{Integerwert} \times \text{Spannungsinkrement} = \text{Spannungswert}$$

#### b) Festmengenquantisierung (relative Quantisierung)



Das Analogsignal wird relativ zu einem Bezugspunkt  $U_0$  zu den Zeiten  $t_0, t_1, \dots, t_N$  abgetastet und zu diesen Zeitpunkten in einen Integerwert umgewandelt. Dieser Integerwert wird dezimal bzw. hexadezimal dargestellt und kann damit digital verarbeitet werden. Dasselbe gilt für den Bezugswert  $U_0$ .

**Beispiel: Umdrehungszähler**



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	<b>Grundlagen 1.2</b>	18.02.2025

### Die Spannungsquantisierung

Sei z.B.  $N=2$  die Anzahl der Bits für die Darstellung der Anzahl der Spannungsinkremente  $\Delta U$ , d.h. es können folgende Werte dargestellt werden:

$$00 \rightarrow 0 \quad (0 \cdot 2^0 + 0 \cdot 2^1) \quad \rightarrow 0 \times \Delta U$$

$$10 \rightarrow 1 \quad (1 \cdot 2^0 + 0 \cdot 2^1) \quad \rightarrow 1 \times \Delta U$$

$$01 \rightarrow 2 \quad (0 \cdot 2^0 + 1 \cdot 2^1) \quad \rightarrow 2 \times \Delta U$$

$$11 \rightarrow 3 \quad (1 \cdot 2^0 + 1 \cdot 2^1) \quad \rightarrow 3 \times \Delta U$$

D.h. das Spannungsinkrement ergibt sich aus dem gesamten darstellbaren Spannungsbereich  $U_{\max}$  gemäß:

$$\Delta U = \frac{U_{\max}}{(2^N - 1)}$$

### Beispiel: 8 Bit ADU (Analog-Digital-Umsetzer)

Beispiel: 8 Bit ADU (Analog-Digital-Umsetzer)

$$U_{\max} = 5V$$

Damit beträgt der Wertebereich des ADU:  $2^8 - 1 = 255$

Daraus ergibt sich das Spannungsinkrement (Quantisierungsstufe) zu:  $\Delta U = \frac{5V}{255} = 19,6 \text{ mV}$

Will man dagegen ein Signal von 1,37 V in einen Digitalwert  $D$  (Integerwert) mit dem 8Bit ADU umwandeln, folgt:

$$D = \frac{U_E}{U_{\max}} (2^N - 1) = 255 \cdot \frac{1,37V}{5V} = 70 \quad \text{mit } D = \frac{U_E}{U_{\max}} (2^N - 1) = \frac{U_E}{\Delta U}$$

Ist dagegen der Digitalwert (ADU-Wert) bekannt, lässt sich das Eingangssignal  $U_E$  bestimmen:

$$U_E = D \cdot \Delta U = 110 \cdot 19,6 \text{ mV} = 2,156V$$

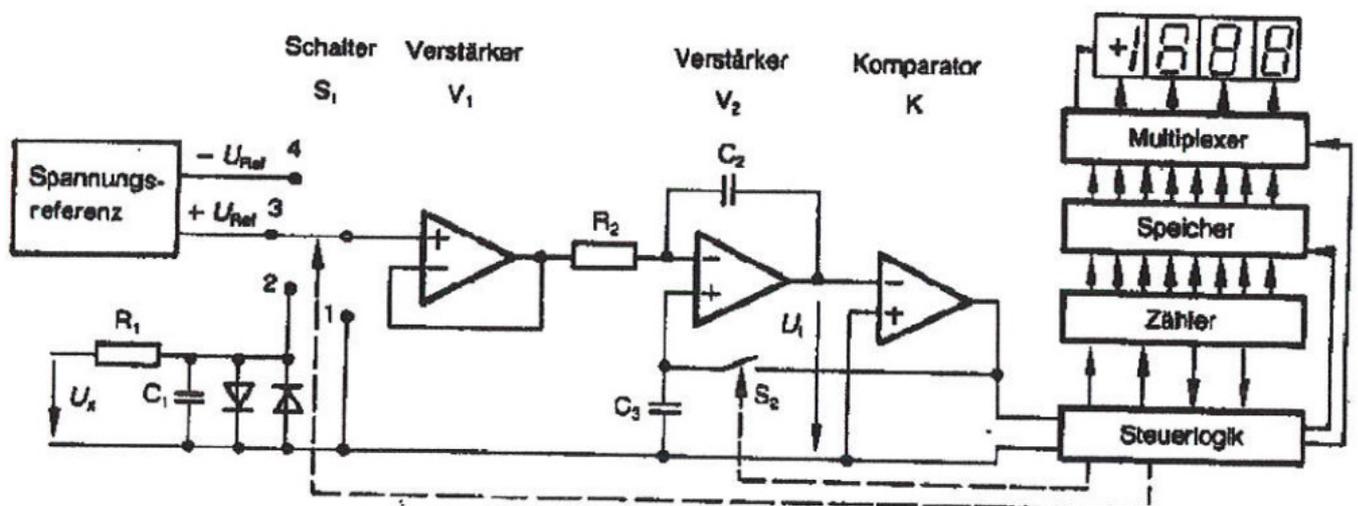
$$\text{Quantisierungsabweichung: } \pm \frac{\Delta U}{2}$$

$$\text{Hier im Beispiel: } \pm \frac{\Delta U}{2} = \frac{19,6 \text{ mV}}{2} = 9,8 \text{ mV}$$

Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

### 1.2.10.6.1 Integrierender ADU, Dual Slope - ADU

Beim integrierenden AD-Wandler erzeugt die unbekannte Spannung  $U_x$  innerhalb einer genau festgelegten Zeit an einem Integrator einen Spannungsanstieg, der zu einer bestimmten Hilfsspannung  $U_1$  führt, die dem Mittelwert der unbekanntes Eingangsspannung proportional ist. Anschließend legt man eine genau bekannte Referenzspannung mit entgegengesetzter Polarität an und misst die Zeit, in der der Integrator wieder auf null läuft. Diese Zeit ist der unbekanntes Spannung  $U_x$  proportional. Das folgende Bild zeigt das Blockschaltbild eines integrierenden AD-Wandlers.

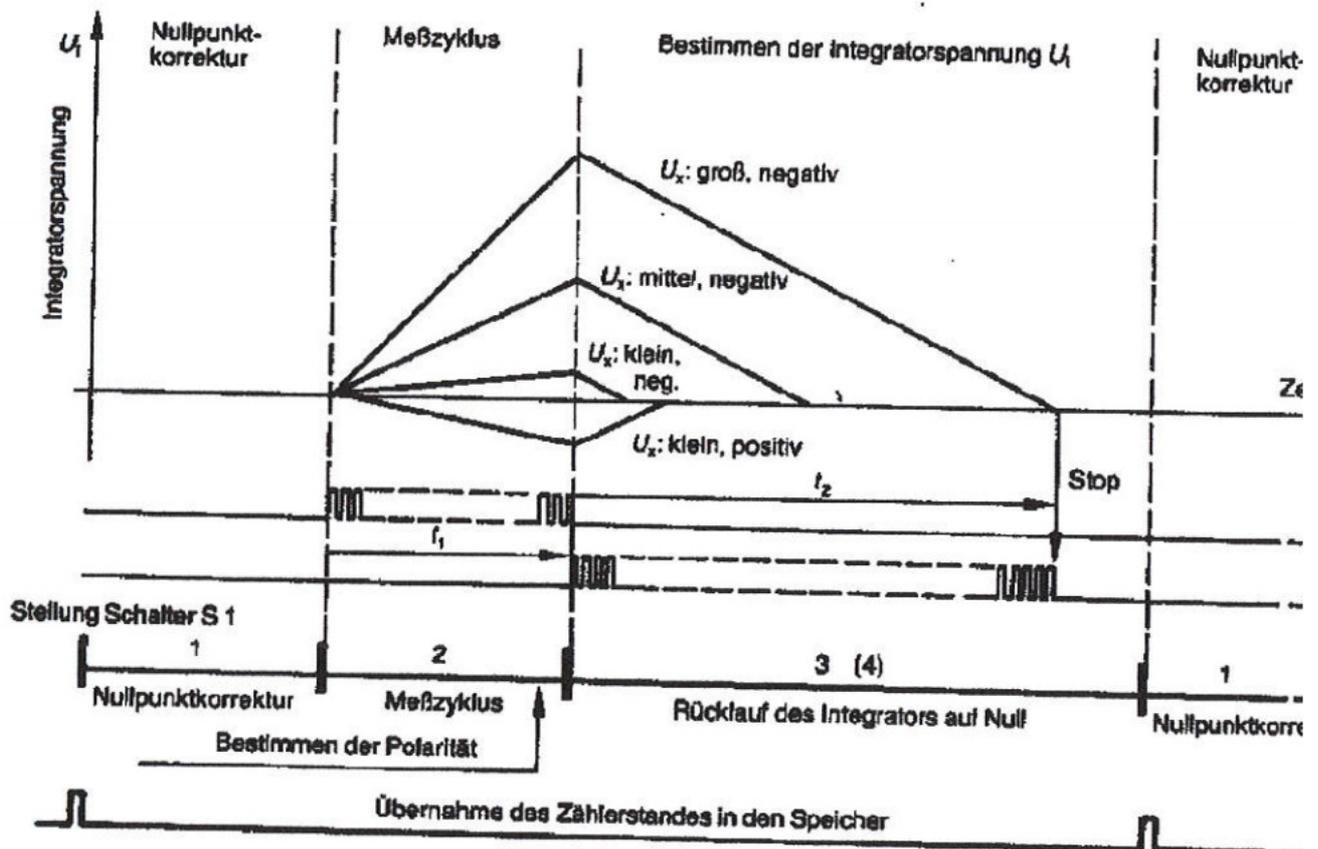


Eine kleine Messspannung veranlasst einen langsamen Spannungsanstieg, eine größere einen schnellen Anstieg. Dieser Anstieg ist in der Mitte des folgenden Bildes zu sehen.

Der Komparator K stellt die Polarität der integrierten Spannung und damit auch die Polarität der Eingangsspannung fest. Nach Ablauf der Messzeit  $t_1$  stellt die Steuerlogik den Schalter  $S_1$  in die Stellung 3 oder 4. Dabei legt man statt der unbekanntes Spannung  $U_x$  die Referenzspannung  $U_{Ref}$  mit umgekehrter Polarität über den Verstärker an den Integrator, wodurch die Ausgangsspannung  $U_i$  des Integrators mit konstanter Änderungsrate wieder zurückgeht.



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025



Der Entladevorgang des Integrators dauert so lange, bis die Ausgangsspannung durch Null geht und der Komparator K die Integration stoppt. Der Zähler zählt die Takte während der Entladezeit  $t_c$  die um so länger dauert, je höher die angelegte Messspannung war.

Die Anzahl der Messtakte ist der unbekanntes Messspannung genau proportional. Wegen der ansteigenden und fallenden Spannungsrampe heißt das Prinzip auch Zweirampenverfahren (engl.: dual slope technique).



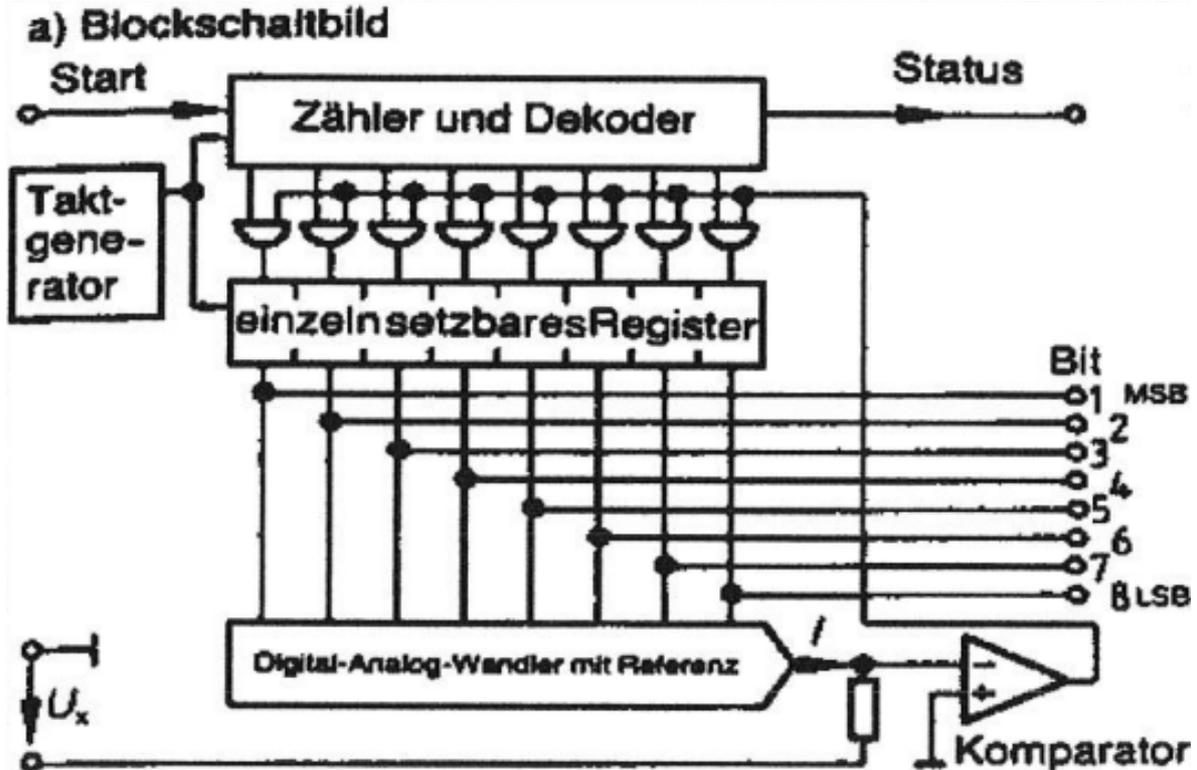
Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

### 1.2.10.6.2 ADU nach dem Verfahren der sukzessiven Approximation

Bei diesem Wandlertyp wird der Digitalwert null um jeweils ein Bit, beginnend mit dem MSB, vergrößert, gleichzeitig in den zugehörigen Analogwert gewandelt und mit dem unbekanntem Analogwert verglichen. Das Ergebnis des Vergleichers nutzt man zur systematischen Annäherung der beiden Werte, die erreicht ist, wenn auch das LSB zum Vergleich herangezogen worden ist.

Für jedes Bit ist ein Vergleich und damit eine Taktperiode erforderlich. Die Wandlungszeit beträgt je nach Typ 0,5us bis 100us, die Genauigkeit 8 Bit bis 18 Bit.

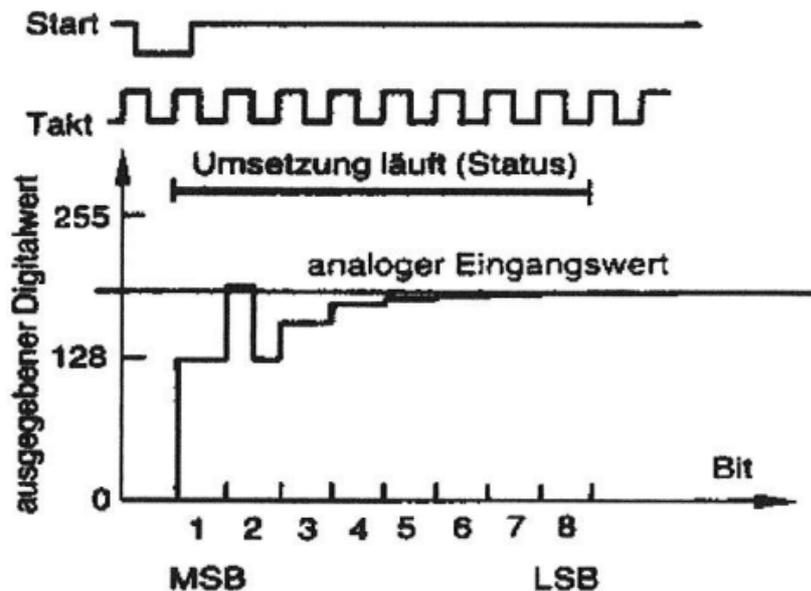
Der erforderliche Aufwand, aber auch die erreichbare Geschwindigkeit ist wesentlich größer als beim integrierenden AD-Wandler, die Genauigkeit ist oft geringer.



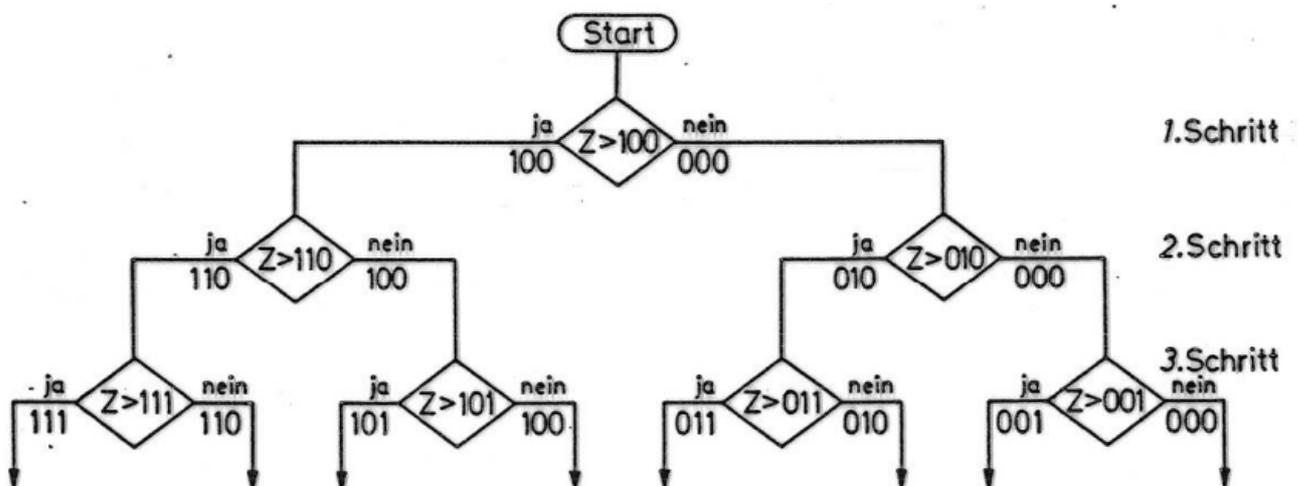


Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

b) Impulsbild, allmähliche Annäherung des Digitalwertes an den Analogwert durch Zuschalten aller notwendigen Bits.



Flussdiagramm für den Ablauf des Wägeverfahrens





Ingenieurwesen II	<b>Sensor- und Steuerungstechnik (SST)</b>	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	<b>Grundlagen 1.2</b>	18.02.2025

Das Wägeverfahren ist weit weniger fehlertolerant als das Zweirampenverfahren. In das Ergebnis gehen alle Fehler des DA-Wandlers, wie Referenzspannungsfehler, Nichtlinearitätsfehler, Offset, Temperatur- und Verstärkungsfehler ein. Überlagerte Störungen oder Wechselspannungen können das Setzen eines Bit veranlassen, das im Messwert nicht enthalten ist.

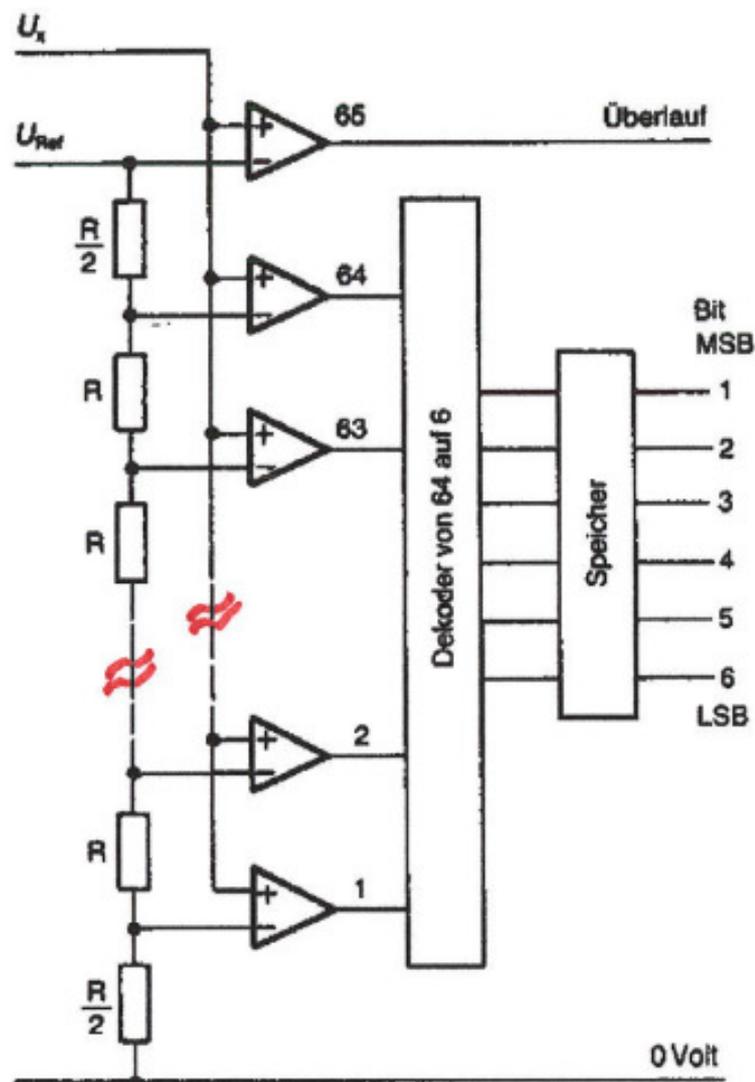
Da dieser Wandler besonders bei schnell sich ändernden Eingangsspannungen Verwendung findet, kann hier ein zusätzlicher entstehen. Abhilfe schafft hier ein sogenanntes Abtast- und Halteglied (sample and hold).

Die hier beschriebenen AD-Wandler sind als mittelschnelle Wandler einzustufen, mit mittlerer bis hohe Genauigkeit (bis 18Bit). Der gegenüber integrierenden Wandlern hohe Preis, rechtfertigt ihren Einsatz nur bei Messspannungen, die sich mit der Zeit schnell ändern, beispielweise für die hochpräzise Digitalisierung von Tonfrequenzen zur Speicherung auf Compact Disc, industrielle Steuerungen und die Kommunikationstechnik sind weitere wichtige Einsatzbereiche.

Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	<b>Grundlagen 1.2</b>	18.02.2025

## 1.2.10.6.3 Parallel - ADU

Die bisher beschriebenen Analog-Digital-Wandler haben den Analogwert durch kontinuierliches Hochzählen oder systematisches Suchen des zugehörigen Digitalwertes ermittelt. Hierzu waren mehrere nacheinander ablaufende Vorgänge erforderlich, die Zeit kosteten. Beim *Parallel-Wandler* (engl.: *flash converter*) wird der richtige Digitalwert innerhalb einer Taktperiode ermittelt und parallel ausgegeben. Das folgende Bild zeigt das Blockschaltbild eines 6Bit-Parallel-AD-Wandlers.





Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	<b>Grundlagen 1.2</b>	18.02.2025

2<sup>n</sup> Komparatoren vergleichen die unbekannte Eingangsspannung gleichzeitig mit den 2<sup>n</sup> möglichen Schwellen. Alle Komparatoren, deren Referenzspannung kleiner als die Eingangsspannung ist geben am Ausgang eine logische „1“ ab, die Komparatoren mit höherer Referenzspannung geben eine logische „0“ ab. Der abgegebene Kode heißt *Thermometer-Code* :(engl: *bar-code*).

Die sehr kurze Wandlungszeit zwischen 5 ns und 100 ns erfordern einen hohen Aufwand gemessen an den bisher vorgestellten Verfahren und ergibt nur mäßige Genauigkeit. Ein 6-Bit-Wandler hat einen Spannungsteiler aus 65 hochgenauen Widerständen, 64 Komparatoren und einen Dekoder mit 64 Eingängen.

Ein 8-Bit-Wandler benötigen einen Teiler mit 256 Ausgängen, 256 parallel betriebene Komparatoren und einen entsprechend großen Dekoder. Die Verlustleistung kann mehrere Watt betragen und muss über das Keramikgehäuse der integrierten Schaltung abgeführt werden.

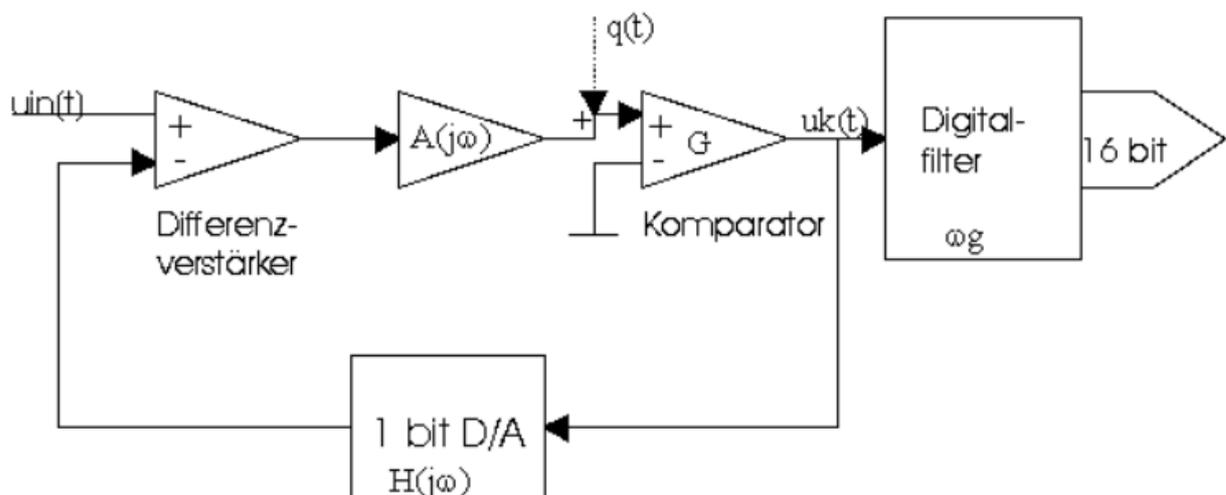
Mit Parallel-Wandlern digitalisiert man heute Messwerte, Video- und Radardaten sowie Zahlreiche andere mit großer Bandbreite anfallende Analogdaten, um sie ohne Genauigkeitsverlust zu speichern und in digitalen Rechnern zu verarbeiten. Da einerseits die 8-Bit-Auflösung für viele Anwendungen nicht ausreicht, andererseits aber jedes weitere Bit Auflösung den Aufwand verdoppelt, wurden andere Wege zur Verbesserung gesucht.



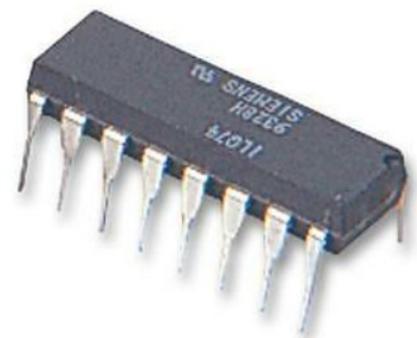
Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

## 1.2.10.6.4 Sigma Delta - ADU, der interpolative Wandler

Die Delta-Sigma-Wandlung hat ihren Hauptgedanken darin, dass man Genauigkeit durch hohe Geschwindigkeit ausdrückt, um die Anforderungen an die Genauigkeit der Bauteile senken zu können. Die folgende Abbildung zeigt ein Blockschaltbild eines solchen Wandlers.



Das Funktionsprinzip beruht darauf, dass das Signal sehr hoch abgetastet wird. Diese Abtastfrequenz, die im Bereich einiger MHz liegt also weit über der aus dem Abtasttheorem sich ergebenden Nyquistfrequenz, steht eine Auflösung von nur einem Bit gegenüber. Durch eine anschließende digitale Tiefpassfilterung wird die Auflösung erheblich erhöht, wobei eine gleichzeitige Reduzierung der Datenrate stattfindet. Der Anwendungsbereich von Delta-Sigma-A/D-Umsetzern befindet sich bei Abtastfrequenzen bis 100kHz und Umsetzungsgenauigkeiten von bis zu 24 Bit.





Ingenieurwesen II	<b>Sensor- und Steuerungstechnik (SST)</b>	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	<b>Grundlagen 1.2</b>	18.02.2025

Delta-Sigma-Wandler, auch Bitstream-Wandler genannt, werden in der Audiowelt heute nahezu ausschließlich verwendet, sind sie doch bei überzeugenden klanglichen Qualitäten auch noch preiswert herzustellen.

Weitere Informationen findet man hier:

[deltasig.PDF \(uni-koeln.de\)](#)

[http://www.uni-koeln.de/phil-fak/muwi/ag/umdruck/deltasig.pdf#:~:text=Bitstream%20-AD%20-Wandlung%20Tats%C3%A4chlich%20arbeitet%20ein%20moderner%20Delta-Sigma,BI%C3%B6cken%3A%20einem%20analogen%20Modulator%20und%20einem%20digitalen%20Filter.sig.PDF \(uni-koeln.de\)](http://www.uni-koeln.de/phil-fak/muwi/ag/umdruck/deltasig.pdf#:~:text=Bitstream%20-AD%20-Wandlung%20Tats%C3%A4chlich%20arbeitet%20ein%20moderner%20Delta-Sigma,BI%C3%B6cken%3A%20einem%20analogen%20Modulator%20und%20einem%20digitalen%20Filter.sig.PDF (uni-koeln.de))



Ingenieurwesen II	Sensor- und Steuerungstechnik (SST)	DI. Matthias Trier
Elektrotechnik (BEII)	Grundlagen 1.2	18.02.2025

### 1.2.10.6 Fehler bei der Datenumsetzung

Fehler die beispielsweise bei der Digital-Analog-Wandlung auftreten können.

