

Ingenieurwissenschaften	Mess- und Regeltechnik	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Vertriebsingenieurwesen	Sensorik u. Messtechnik	15. Januar 2011

## 1.2 Analoge und digitale Messtechnik

### 1.2.1 Digitalmessgeräte

Die digitale 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 sich um Fein- bzw Elektromechanik handelt, bedarf es auch einer besonderen Sorg-



(Abbildung Fa. Fluke)

falt 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.

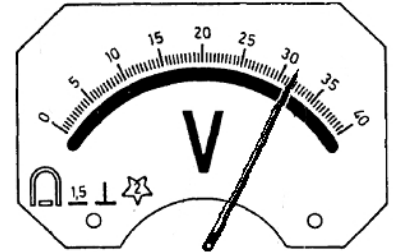


Beim DMM handelt es sich einfach um ein elektronisches Messgerät zur Durchführung von elektrischen Messungen. Es kann im Gegensatz zum Analogmultimeter mit jeder Menge von Sonderfunktionen ausgestattet sein, aber mit einem DMM werden hauptsächlich Spannung (Volt), Widerstand (Ohm) und Strom (Ampère)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

Ingenieurwissenschaften	Mess- und Regeltechnik	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Vertriebsingenieurwesen	Sensorik u. Messtechnik	15. Januar 2011

### 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 benötigt.



- 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 --

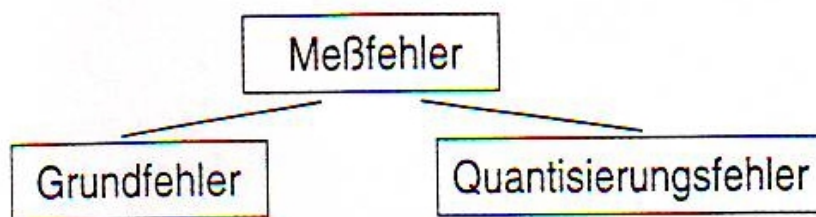
Ingenieurwissenschaften	Mess- und Regeltechnik	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Vertriebsingenieurwesen	Sensorik u. Messtechnik	15. Januar 2011

### 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!**

**Brühl**

Ingenieurwissenschaften	Mess- und Regeltechnik	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Vertriebsingenieurwesen	Sensorik u. Messtechnik	15. Januar 2011

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

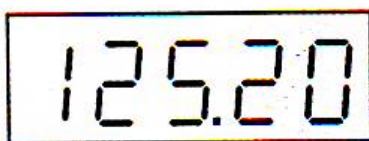
Berechnung des **Quantisierungsfehlers**:

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



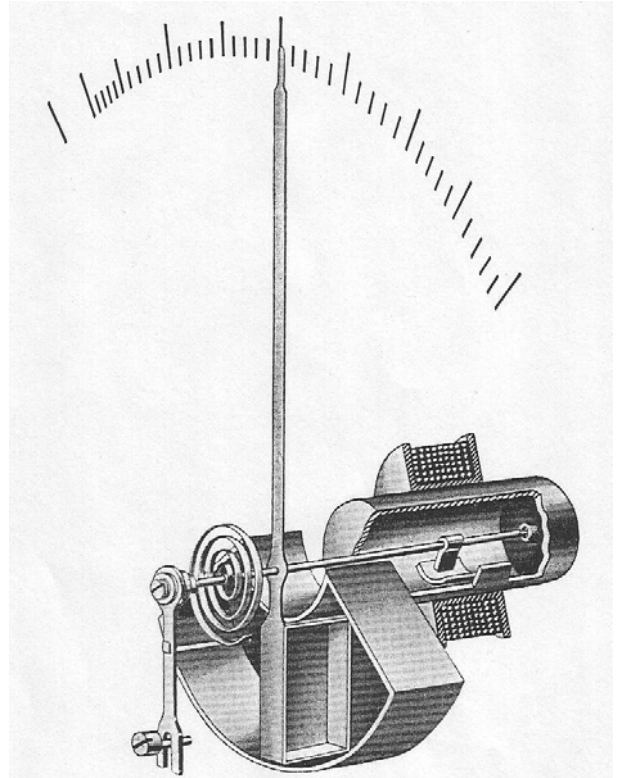
$$\underline{\underline{F_{\%} = \mp 0,53\%}}$$

Ingenieurwissenschaften	Mess- und Regeltechnik	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Vertriebsingenieurwesen	Sensorik u. Messtechnik	15. Januar 2011

## 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.



Ingenieurwissenschaften	Mess- und Regeltechnik	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Vertriebsingenieurwesen	Sensorik u. Messtechnik	15. Januar 2011

Skalengleichung des Dreheisenmessgerätes:

4.)  $M_{\text{MAGN.}} \sim B \cdot I_M$

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

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

1.)  $B = \mu_0 \cdot H$

2.)  $H = \frac{I \cdot N}{l}$

$\mu_0 = \text{MAGNET. FELD KONSTANTE}$   
 $\mu_0 = \text{PERMIABILITÄT } \left[ \frac{Vs}{Am} \right]$   
 $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am}$   
 $H = \text{MAGNET. FELDSTÄRKE } \left[ \frac{A}{m} \right]$   
 $B = \text{INDUKTION (MAGNET. FLUSSDICHTE) } [T]$

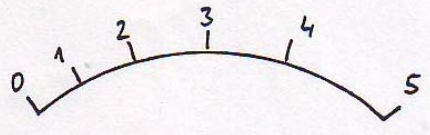
Da  $M_{\text{MECH}} \sim \alpha$  folgt:  $\alpha \sim I_M^2$  SKALENGLEICHUNG

AUS DER SKALENGLEICHUNG FOLGT:

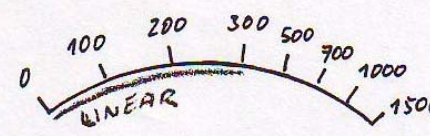
1. DIE SKALA IST NICHT LINEAR
2. POLARITÄTSUNABHÄNGIGKEIT

DIE LINEARISIERUNG DER MESSGERÄTESKALEN ERFOLGT DURCH DIE:


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



TYPISCHE-SKALA





ÜBERLAST-SKALA



VOLLTASTE

EINSATZBEREICHE VON DREH SPUL- UND DREHEISEN MW AM BEISPIEL DER VERLUSTLEISTUNG:

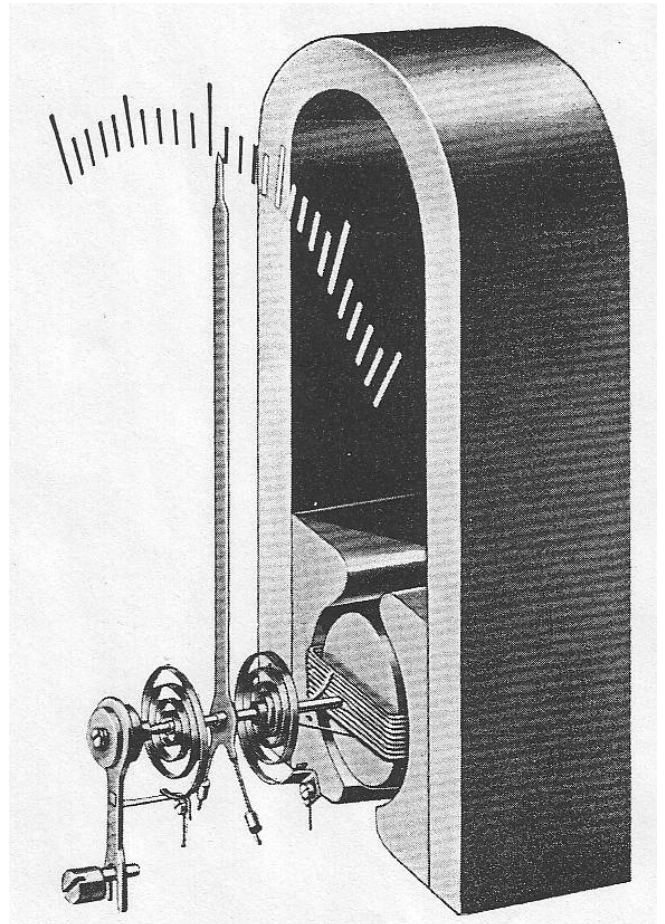
	$P_M$
	$10^{-4} \dots 10^{-2} W$
	$0,5 \dots 3 W$ ←

DA EINE GROSSE INDUKTION  $B$  ERZEUGT WERDEN MUSS

Ingenieurwissenschaften	<b>Mess- und Regeltechnik</b>	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Vertriebsingenieurwesen	<b>Sensorik u. Messtechnik</b>	15. Januar 2011

### 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.

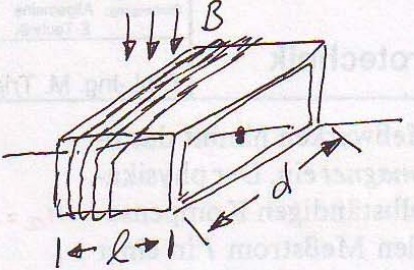


Das Drehspul-Messwerk ist das messempfindlichste elektrische Messwerk. Ströme in der Größenordnung von Milliardstel Ampere können damit gemessen werden. Durch Vorschalten eines Gleichrichters oder eines Thermoumformers sind auch Wechselströme bis zu hohen Frequenzen messbar. Daher werden Wechselstrommessungen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



Ingenieurwissenschaften	Mess- und Regeltechnik	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Vertriebsingenieurwesen	Sensorik u. Messtechnik	15. Januar 2011

Skalengleichung des Drehspulmessgerätes:



ALU RAHMEN MIT WICKLUNG

$B = \text{INDUKTION}$

$W = \text{WINDUNGSZAHL}$

$I_M = \text{MESSSTROM}$

$d = \text{RÄHNCHENDURCH}$

$l = \text{RÄHNCHENHÖHE}$

$\alpha = \text{ZEIGERAUSSCHLAG (FEDERAUSLENKUNG)}$

1. KRAFT AUF EINEN LEITER

$$F = I_M \cdot W \cdot B \cdot l$$

2. DAS MAGNETISCHE MOMENT LAUFET

$$M_{EL} = 2 \cdot F \cdot \frac{d}{2}$$

$$M_{EL} = I_M \cdot W \cdot B \cdot l \cdot d$$

$l \cdot d = A$

$$M_{EL} = I_M \cdot W \cdot B \cdot A$$

↑ ↑ ↑  
KONSTANTE GRÖSSEN

3. PRINZIP DER SELBSTSTÄNDIGEN KOMPENSATION

MECHANISCHES MOMENT  $M_{MECH} = C \cdot \alpha$

$$M_{EL} = M_{MECH}$$

$$I_M = C \cdot \alpha$$

↑  
FEDERKONSTANTE

$\alpha \sim I_M$

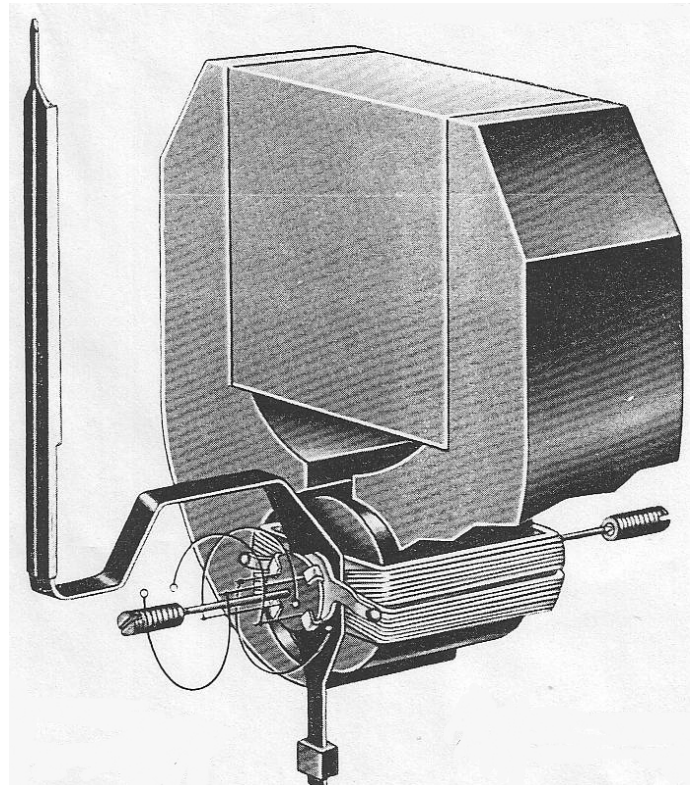
SKALENGLEICHUNG



Ingenieurwissenschaften	Mess- und Regeltechnik	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Vertriebsingenieurwesen	Sensorik u. Messtechnik	15. Januar 2011

### 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

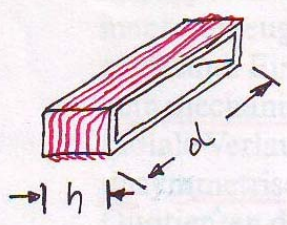


dann auf, wenn auch die an jeder Spule wirksamen Induktionen gleich sind. Ist einer der beiden Ströme schwächer als der andere, so nimmt die Kreuzspule eine bestimmte andere Lage ein, bei der sich die vom schwächeren Strom durchflossene Spule im Gebiet höherer Induktion und die vom stärkeren Strom durchflossene 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.

Ingenieurwissenschaften	Mess- und Regeltechnik	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Vertriebsingenieurwesen	Sensorik u. Messtechnik	15. Januar 2011

Skalengleichung des Kreuzspulmessgerätes:

**ANALOGIE ZUM DREHSPULMESSWEIL:**



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

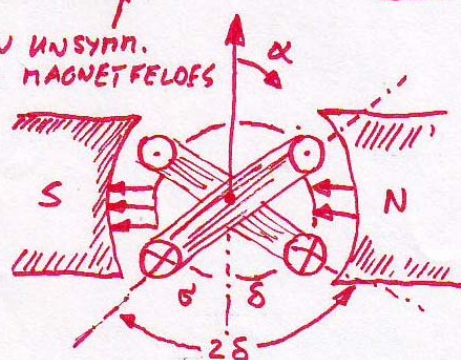
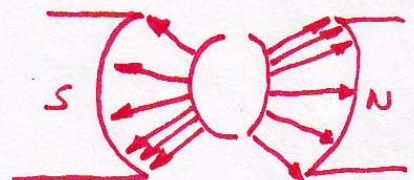
$M_{EL1} = I_{m1} \cdot \cos(\alpha - \delta)$      SPULE 1  
 $M_{EL2} = I_{m2} \cdot \cos(\alpha + \delta)$      SPULE 2

$I_{m1} \cdot \cos(\alpha - \delta) = I_{m2} \cdot \cos(\alpha + \delta)$

feldverhältnis zu

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

↑  
COS DURCH DEN UNSYMM. VERLAUF DES MAGNETFELDES

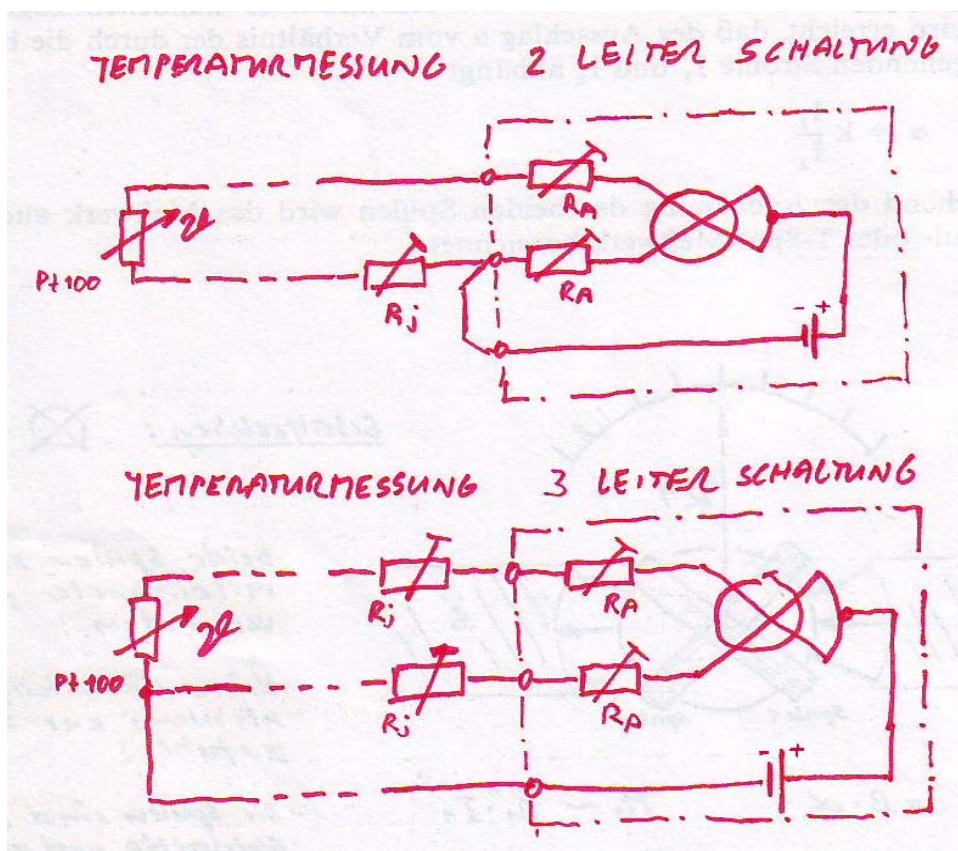



UNSYMMETRISCHES MAGNETFELD



Ingenieurwissenschaften	Mess- und Regeltechnik	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Vertriebsingenieurwesen	Sensorik u. Messtechnik	15. Januar 2011

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!**

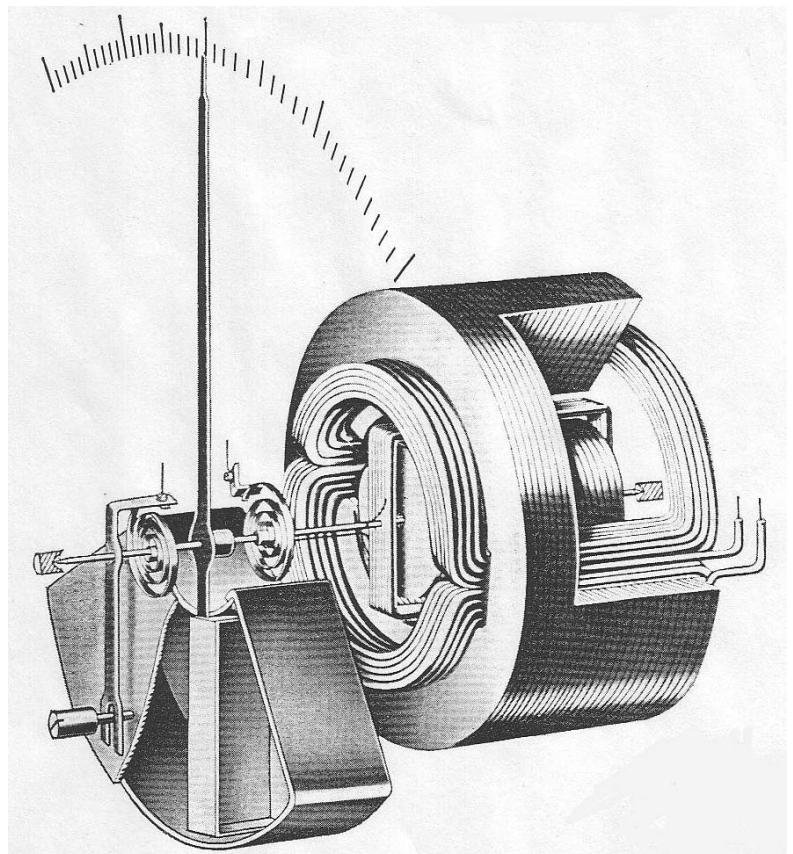
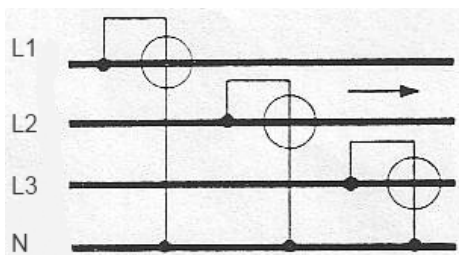


Ingenieurwissenschaften	Mess- und Regeltechnik	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Vertriebsingenieurwesen	Sensorik u. Messtechnik	15. Januar 2011

#### 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.

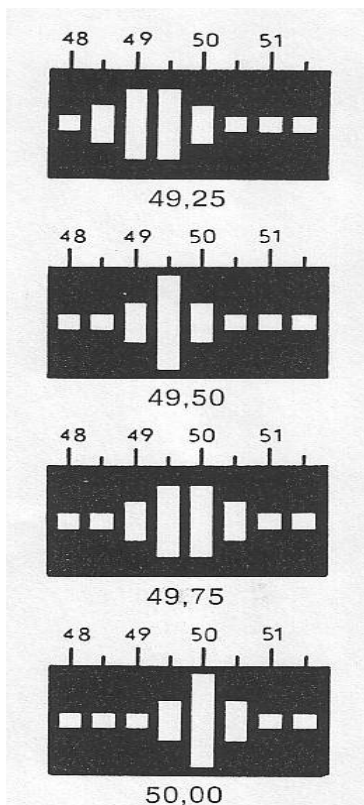
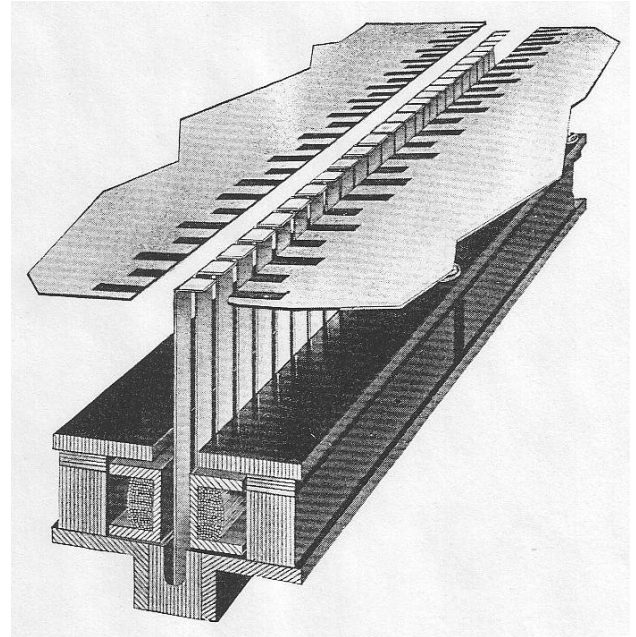
Das Schaltbild zeigt die Leistungsmessung mit drei Messwerken in einem ungleich belasteten Vierleiter-Drehstrom-Netz. Die Leistung ist die Summe der Einzelanzeigen. Ein Dreifach-Leistungsmesser addiert die Drehmomente und zeigt die Leistung des Drehstromes unmittelbar an.



Ingenieurwissenschaften	Mess- und Regeltechnik	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Vertriebsingenieurwesen	Sensorik u. Messtechnik	15. Januar 2011

### 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.



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).



Ingenieurwissenschaften	<b>Mess- und Regeltechnik</b>	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Vertriebsingenieurwesen	<b>Sensorik u. Messtechnik</b>	15. Januar 2011

### 1.2.4.6 Sinnbilder zur Gerätekennzeichnung

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			



Ingenieurwissenschaften	Mess- und Regeltechnik	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Vertriebsingenieurwesen	Sensorik u. Messtechnik	15. Januar 2011

## 1.2.5 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)

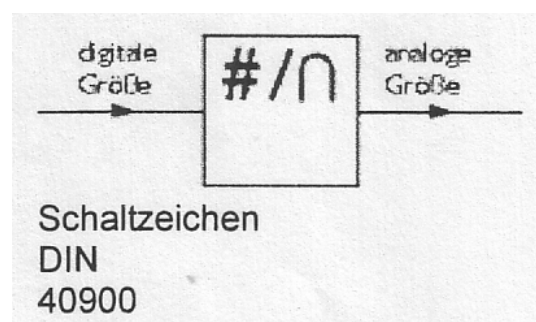
DAC (Digital-Analog-Converter)

AD (Analog-Digital-Wandler)

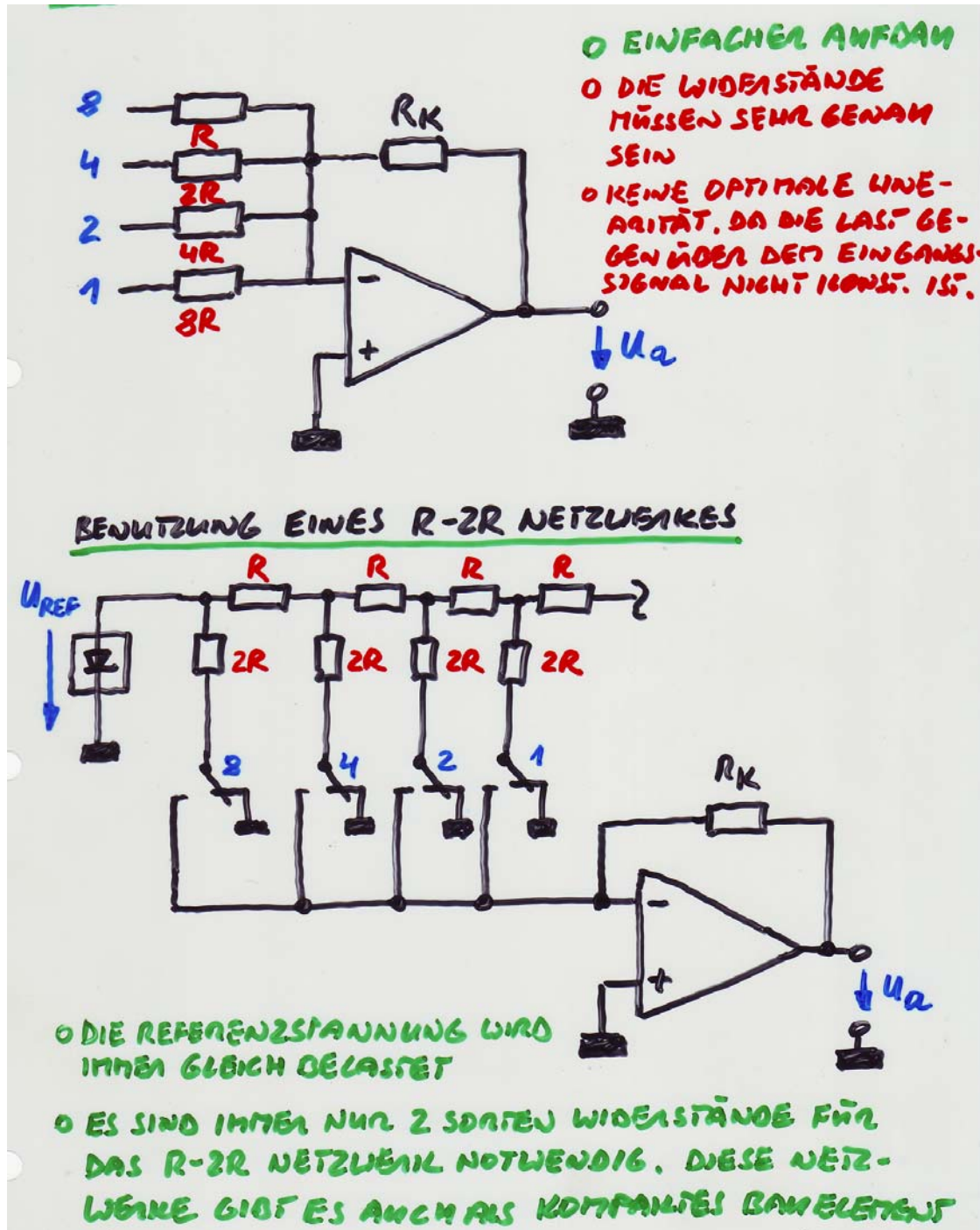
DA (Digital-Analog-Wandler)

### 1.2.5.1 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.



Digital-Analog-Wandlung durch Addition von Teilströmen



Ingenieurwissenschaften	<b>Mess- und Regeltechnik</b>	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Vertriebsingenieurwesen	<b>Sensorik u. Messtechnik</b>	15. Januar 2011

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.

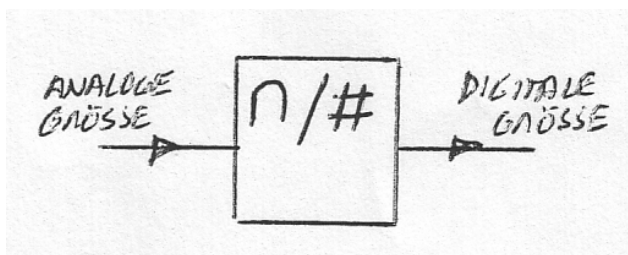
**Beispiel:**

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 =  $5V / 255 = 20mV$

**1.2.5.2 Analog-Digital-Wandler**

Sollen analoge Messgrößen weiter verarbeitet 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.



**1.2.5.2.1 Abtastung (Sampling) von Analogsignalen**

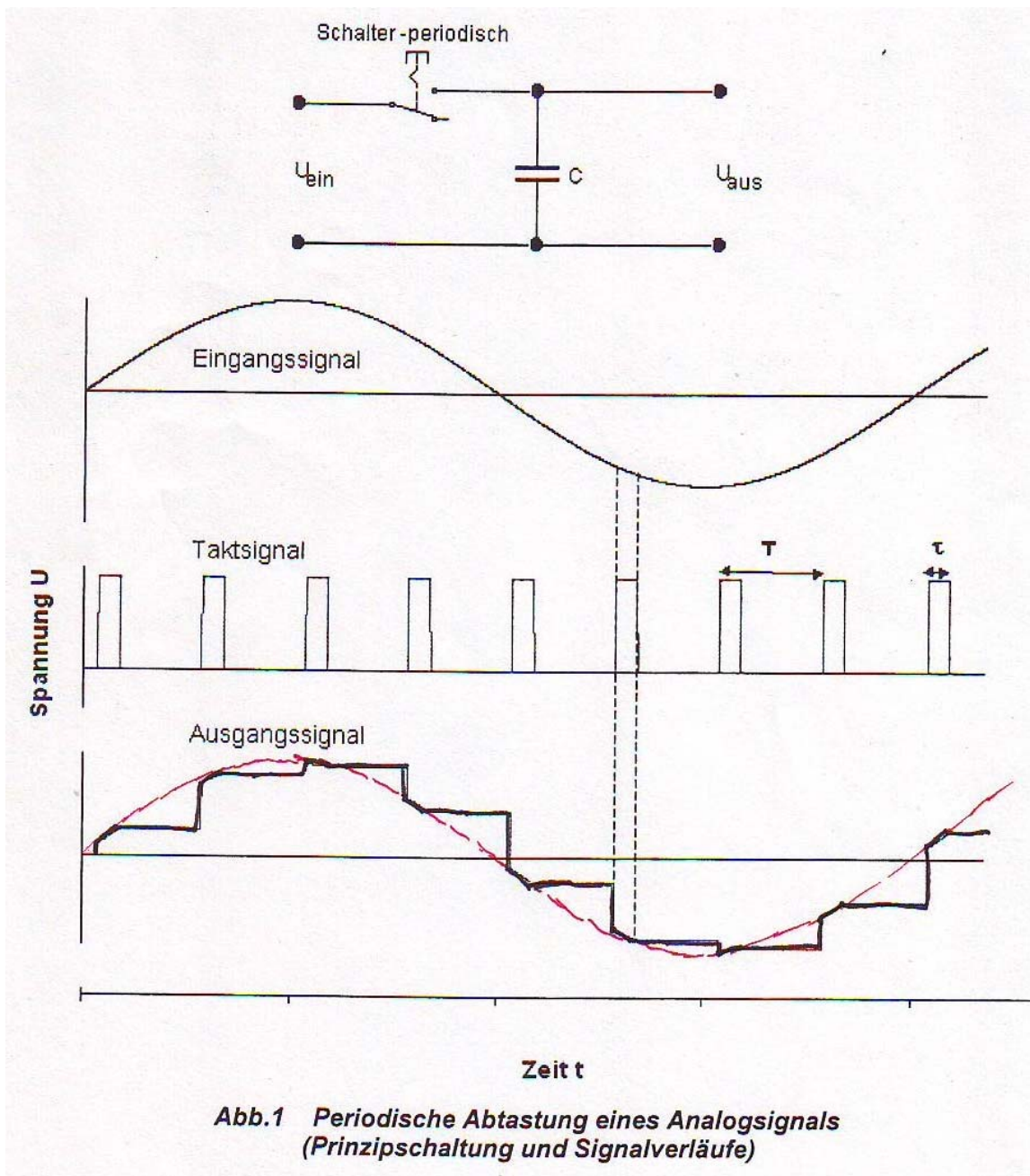
Da sich analoge Messwerte während der Wandlung u.U. schnell verändern können, ist es für die Zeitdauer des Wandlungsvorganges für die Genauigkeit und letzten Endes für das Ergebnis besonders wichtig, dass sich die Werte nicht ändern. Daher geht man ganz allgemein



Ingenieurwissenschaften	<b>Mess- und Regeltechnik</b>	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Vertriebsingenieurwesen	<b>Sensorik u. Messtechnik</b>	15. Januar 2011

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.



Ingenieurwissenschaften	<b>Mess- und Regeltechnik</b>	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Vertriebsingenieurwesen	<b>Sensorik u. Messtechnik</b>	15. Januar 2011

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 Analogschalter 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.

### 1.2.5.2.2 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.



**Brühl**

Ingenieurwissenschaften	<b>Mess- und Regeltechnik</b>	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Vertriebsingenieurwesen	<b>Sensorik u. Messtechnik</b>	15. Januar 2011

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.

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.



**Brühl**

Ingenieurwissenschaften	<b>Mess- und Regeltechnik</b>	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Vertriebsingenieurwesen	<b>Sensorik u. Messtechnik</b>	15. Januar 2011

### 1.2.5.2.3 Verfahren zur Analog-Digital-Wandlung

Die hier aufgeführten AD-Schaltungstypen repräsentieren die gängigen Verfahren.

Tabelle 9-1. Verfahren zur Analog-Digital-Wandlung.

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; störempfindlich
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 Oszilloskope, Transientenrecorder, zur Digitalisierung von Videosignalen, Kommunika- tionstechnik, Überwachungstechnik (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 UMSETZEL

② WÄGEVERFAHREN (DIGIT AT TIME)

③ PARALLELVERFAHREN (WORD AT TIME)  
MOMENTANWERTUMSETZEL

Ingenieurwissenschaften	Mess- und Regeltechnik	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Vertriebsingenieurwesen	Sensorik u. Messtechnik	15. Januar 2011

### 1.2.5.3 Fehler bei der Datenumsetzung

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

