

# Praktikum Elektrotechnik (ET)

## Technische Beschreibung Versuche



Elektrotechnik und  
Technische Informatik  
Prof. Dr. Ing. Stefan Haas



**Bitte verlassen Sie den Laborplatz so, wie Sie  
ihn vorgefunden haben.**

Bitte nicht mitnehmen! Es dient als Nachschlagewerk für die Versuche.

<b>1</b>	<b>Elektrische Leistung, Arbeit und Wirkungsgrad.....</b>	<b>1</b>
1.1	Elektrische Leistung.....	1
1.2	Elektrische Arbeit und Wirkungsgrad.....	2
1.3	Beschreibung der Messgeräte.....	3
1.3.1	Digital Multimeter.....	3
1.3.2	Messung von Strom mit einer Stromzange (AC Stromzangenadapter).....	6
<b>2</b>	<b>Messungen mit dem Elektronenstrahl - Oszilloskop .....</b>	<b>8</b>
2.1	Oszilloskop:.....	8
2.2	Aufbau der Elektronenstrahlröhre (Braunsche Röhre) .....	9
2.3	Funktionsweise der Elektronenstrahlröhre .....	11
2.4	Bedienung des Oszilloskops.....	12
2.4.1	Bedienelemente .....	12
2.4.2	Bedienungshinweise.....	13
2.5	Messungen mit dem Oszilloskop .....	14
2.5.1	Messarten .....	14
2.5.2	allgemeine Hinweise (siehe auch Kapitel Standard - Oszilloskope) .....	15
2.6	Der Abbildungsvorgang.....	16
2.6.1	Darstellung periodischer Zeitfunktionen $u_y(t)$ .....	16
2.7	Standard - Oszilloskope .....	21
2.7.1	Zweistrahler - Oszilloskope.....	22
2.7.2	Zweikanal – Oszilloskope .....	22
2.7.3	Speicher - Oszilloskope.....	25
2.8	Schmitt - Trigger .....	26
<b>3</b>	<b>Versuch 3- Kondensator und Spule.....</b>	<b>27</b>
3.1	Kondensator.....	27
3.1.1	Zusammenhang zwischen Ladung und Spannung.....	27
3.1.2	Parallel- und Reihenschaltung von Kondensatoren.....	28
3.1.3	Aufladen und Entladen eines Kondensators.....	29
3.1.4	Wechselstromwiderstand bei sinusförmiger Wechselspannung.....	31
3.2	Die Spule (Drossel) .....	32
3.2.1	Auf- und Entmagnetisieren einer Spule .....	33
3.2.2	Die reale Spule (mit Verlusten).....	35

# 1 Elektrische Leistung, Arbeit und Wirkungsgrad

## 1.1 Elektrische Leistung

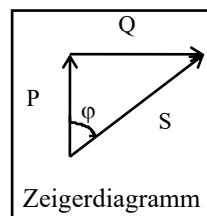
Bei Gleichstrom lässt sich die elektrische Leistung direkt aus dem Produkt von Spannung  $U$  und Strom  $I$  berechnen:

$$P = U \cdot I$$

Dieser Leistung entspricht bei Wechselstrom die Wirkleistung  $P$ . Sie ist unter der Berücksichtigung des Phasenwinkels  $\varphi$  zwischen Spannung  $U$  und Strom  $I$  zu berechnen:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Die Blindleistung  $Q$  entspricht im Wechselstromkreis dem Anteil der Energie, der zwischen induktiven und kapazitiven Geräten hin- und herpendelt. Die Scheinleistung  $S$  ergibt sich als Produkt aus Spannung  $U$  und Strom  $I$ . Nur die Wirkleistung  $P$  ist eine Leistung im physikalischen Sinne.



		Einheit
Scheinleistung	$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$	VA
Wirkleistung	$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$	W
Blindleistung	$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$	Var
Leistungsfaktor	$\cos \varphi = \frac{P}{S}$	

Die Leistung bei Gleichstrom und die Wirkleistung bei Wechselstrom können mit einem elektrodynamischen Messwerk bestimmt werden. Der Zeigerausschlag  $\alpha$  ist dem Produkt aus zwei Strömen proportional:

$$\alpha = c \cdot I_1 \cdot I_2$$

Dabei ist  $I_1$  ein Strom in der Drehspule, der der anliegenden Spannung proportional ist,  $I_2$  ist der in der Erregerspule fließende Gleichstrom bzw. bei Wechselstrom die Wirkkomponente  $I_{2W} = I_2 \cos \varphi$ ,  $c$  ist eine Konstante. Durch geeignete Vor- und Parallelwiderstände lässt sich jedes Messwerk an die Messaufgabe anpassen.

---

## 1.2 Elektrische Arbeit und Wirkungsgrad

Zur Messung der elektrischen Arbeit verwendet man integrierende Meßwerke. Der Wechselstromzähler mit Induktionsmesswerk misst die Wirkarbeit  $W$ :

$$W = U \cdot I \cdot t \cdot \cos \varphi$$

Das Induktionsmesswerk ist mit einem Zählwerk verbunden. Die Anzahl der Umdrehungen der Läuferscheibe pro Arbeitseinheit ist die Zählerkonstante  $z$  in Umdrehungen/kWh. Die Arbeit  $W$  lässt sich aus den ermittelten Umdrehungen  $u$  der Läuferscheibe berechnen:

$$W = \frac{u}{z}$$

Mit  $n = U/t$  (Drehzahl = Umdrehungen pro Zeiteinheit) gilt auch:

$$P = \frac{n}{z}$$

Der Wirkungsgrad ist definiert als Quotient von abgegebener zu aufgenommener Arbeit bzw. Leistung

$$\eta = \frac{W_{\text{ab}}}{W_{\text{auf}}} = \frac{P_{\text{ab}}}{P_{\text{auf}}}$$

Die Umrechnung der elektrischen Energie in mechanische Energie bzw. Wärmeenergie erfolgt über die Beziehung:

$$1 \text{Ws} = 1 \text{Nm} = 1 \text{J}$$

Der Wärmeenergiehaushalt einer erwärmten Masse  $m$  bei der Temperaturdifferenz  $\Delta \vartheta$  errechnet sich mit der spezifischen Wärmekapazität  $c$  (bei Wasser:  $c_w = 4,18 \text{ kJ/kgK}$ ) zu:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta \vartheta$$

### 1.3 Beschreibung der Messgeräte

#### 1.3.1 Digital Multimeter

##### Beschreibung:

(Benutzte Quelle: Bedienungsanleitung VC220 -VC250, Conrad Elektronik)

Im Elektrotechnik- Praktikum sollen Sie den sicheren Umgang mit einem digitalen Multimeter (DMM) zum Erfassen elektrotechnischer Größen erlernen.

Digitales Multimeter können verschiedene elektrische Größen messen und auf einem Zahlendisplay anzeigen. Die häufigsten angewendeten Multimeter diene zum Erfassen und Anzeigen elektrischer Größen im Bereich der Überspannungskategorie CAT III (bis max. 600V gegen Erdpotential, gemäß EN 61010-1) und alle niedrigere Kategorie)

Das in unserem Praktikum verwendete DMM kann folgende elektrotechnische Größen erfassen:

- Messen von Gleich- und Wechselspannungen bis max. 600 V
- Messen von Gleich- und Wechselstrom bis max. 10 A
- Messen von Widerständen bis 40 M $\Omega$
- Batterietest für 1,5 und 9V-Batterien)
- Durchgangsprüfung (<10  $\Omega$  akustisch)
- Dioden Test

Einige Multimeter können auch

- Frequenzmessung bis 10 MHz (nur VC270 und VC290)
- Messen von Kapazitäten bis 100  $\mu$ F (nur VC270 und VC290) durchführen.



##### Display und Anzeige:

Die Genauigkeit der Anzeige hängt u.a. auch von der Anzahl der angezeigten Zahlen ab.

Unser verwendetes DMM hat eine 3 ½ stellige Anzeige. Das bedeutet, dass eine Ziffern- Anzeige von 000 bis 1999 möglich ist. Die kleinste Stelle bezeichnet man als Digit. Das ist wichtig, wenn man eine Abschätzung der Messfehler vornehmen möchte (siehe dazu auch Messfehler)







Auf dem Display wird gleichzeitig angezeigt, welche Art der Messgröße

- Gleichspannung / -strom:  
Kennzeichnung durch ein – vor dem Messwert
- Wechselspannung / -strom:  
Kennzeichnung durch AC vor dem Messwert
- Widerstandsmessung:  
Angabe der Einheit Ohm / k Ohm /M Ohm
- Durchgangs- und Dioden Test:  
Kennzeichnung einer Diode und Musik-Note
- Gleichzeitig wird zu jedem Messbereich im unteren Teil die Kontaktierungs-  
entsprechenden Buchsen angegeben
- Bei gefährlichen Spannungen und Strom wird mit einem Blitz aufmerksam gemacht!



Die Symbole und Angaben sind je nach Modell unterschiedlich vorhanden.

Bedeutung einiger ausgewählter Symbole:

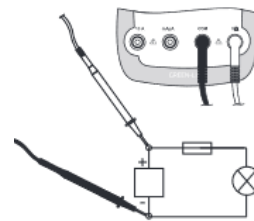
	OL oder 1. Overload = Überlauf; der Messbereich wurde überschritten
	Batteriewechselsymbol schnellstmöglich die Batterie wechseln um Messfehler zu vermeiden!
	~ AC Wechselgröße für Spannung und Strom
	= DC Gleichgröße für Spannung und Strom
mV	Milli-Volt (exp.-3)
V	Volt (Einheit der elektrischen Spannung)
A	Ampere (Einheit der elektrischen Stromstärke)
mA	Milli-Ampere (exp.-3)
$\mu$ A	Micro-Ampere (exp.-6)
$\Omega$	Ohm (Einheit des elektrischen Widerstandes)
K $\Omega$	Kilo-Ohm (exp.3)
M $\Omega$	Mega-Ohm (exp.6)
	Symbol für den Batterietest
	Symbol Blitz erscheint im Spannungs-Messbereich 600 V

Die Umschaltung der Messgrößen und -bereiche erfolgt meist mechanisch. Hochwertige DMM wählen den Spannungsmessbereich selbst, können sich gegen Überlastung und Überspannungen schützen und messen Wechselgrößen als Effektivwert.

### Spannungsmessung:

Schalten Sie das DMM ein und wählen den Messbereich „V“. Für kleine Spannungen bis max. 200/400 mV wählen Sie den Messbereich „mV“

- Stecken Sie die rote Messleitung in die V-Messbuchse, die schwarze Messleitung in die COM-Messbuchse.
- Verbinden Sie die beiden Messspitzen mit dem Messobjekt.
- Die rote Messspitze entspricht dem Pluspol, die schwarze Messspitze dem Minuspol.
- Die jeweilige Polarität des Messwertes wird zusammen mit dem augenblicklichen Messwert im Display angezeigt.



☞ Sobald bei der Gleichspannung ein Minus „-“, vor dem Messwert erscheint, ist die gemessene Spannung negativ (oder die Messleitungen sind vertauscht).

Der Spannungsbereich „V DC/AC“ weist einen Eingangswiderstand von >10 MOhm, der „mV DC“-Messbereich >4000 MOhm auf.

### Messen einer Wechselspannung:

- Schalten Sie am Bereichsschalter in den AC-Messbereich um. Im Display erscheint „AC“.
- Stecken Sie die rote Messleitung in die V-Messbuchse, die schwarze Messleitung in die COM-

- Messbuchse.
- Verbinden Sie die beiden Messspitzen mit dem Messobjekt.
- Der Messwert wird im Display angezeigt.

DMM verwenden zur Messung einer Wechselspannung eine Schaltung als Präzisionsgleichrichter. Digitalmultimeter, die den tatsächlichen Effektivwert (englisch true RMS) eines beliebigen Spannungsverlaufes messen können, sind mit einer Vorrichtung (integrierter Schaltkreis oder Software in einem Mikrocontroller) ausgestattet, die analog oder digital den Effektivwert errechnet.

### Strommessung:

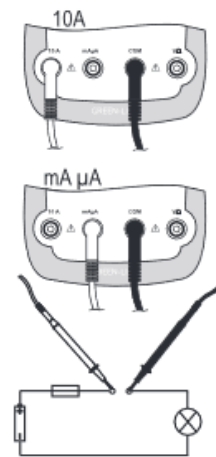
Beginnen Sie die Strommessung immer mit dem größten Messbereich und wechseln ggf. auf einen kleineren Messbereich. Vor einem Messbereichswechsel immer die Schaltung stromlos schalten.

Wählen Sie den Messbereich und des zugehörigen Messbuchsen:

Messfunktion	Messbereich	Messbuchse
$\mu\text{A}$	$< 200\mu\text{A}$	CON +mA $\mu\text{A}$
mA	$200\mu\text{A} - 199\text{mA}$	COM + mA $\mu\text{A}$
A	$200\text{mA} - 10\text{A}$	COM + 10 A

Messen Sie im 10A-Bereich auf keinen Fall Ströme über 10 A bzw. im mA/ $\mu\text{A}$ -Bereich Ströme über 400 mA, da sonst die Sicherungen auslösen.

Hinweis: Wenn Sie bei der Spannungsmessung die Messbuchsen für die Strommessung verwenden kann es zu einem Kurzschluss führen. Die internen Sicherungen lösen aus und müssen in der Regel gewechselt werden.



### Berechnung der Fehlergrenze:

In den Technischen Daten des verwendeten DMM sind für jeden Messbereich die Genauigkeiten und die Auflösungen angegeben.

Beispiel:

Messung einer Gleichspannung im Messbereich von 200mV:

Messwertanzeige 80,2mV

Im Datenblatt ist für diesen Messbereich angegeben:

Genauigkeit:  $\pm(0,5\% + 8 \text{ Digit})$

Auflösung: 0,1mV

Berechnung der Fehlergrenzen:

$80,2 \cdot 0,5\% = 0,4$  bei 0,1mV Auflösung sind 1 Digit 0,1

$U = 80,2\text{mV} \pm 0,4\text{mV} + 0,8\text{mV}$

Fehlergrenze:  $U = 81,4\text{ mV}$  bis  $79\text{mV}$

**Übungsbeispiel:**

Es wird die Netzspannung gemessen, der Messwert ist 230V AC

Im Datenblatt ist für Wechselspannungsmessung angegeben:

Messbereich	Genauigkeit	Auflösung
2V	$\pm (1,0\% + 10)$	0,001V
20V		0,01V
200V		0,1V
600V	$\pm (1,3\% + 7)$	1V

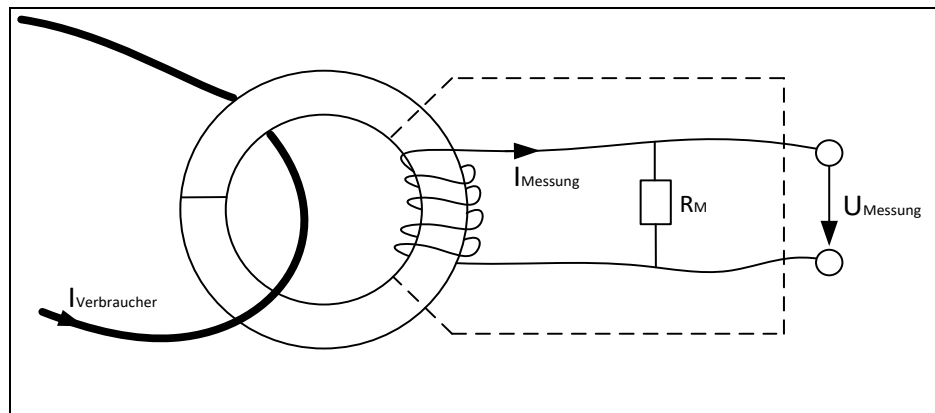
Berechnen Sie die Fehlergrenzen für diesen Messwert

(Lösung: 240 bis 220V)

**1.3.2 Messung von Strom mit einer Stromzange (AC Stromzangenadapter)**

Während bei der direkten Messung der Stromkreis aufgetrennt werden muss, um das Strommessgerät in die elektrische Leitung in Reihe zum Verbraucher zu schalten, ist dies bei der Messung mit einem Zangenstrommesser (indirekte Messung) nicht erforderlich. Aufgrund des zangenartig teilbaren Eisenkerns kann man Leiter umfassen, ohne den Stromkreis auftrennen zu müssen.

Bei Wechselstrom-Zangenstrommessern wird das Transformator-Prinzip angewendet. Die Stromzange fungiert hierbei als magnetischer Messwandler/Stromwandler. Dabei bildet die Stromzange im geschlossenen Zustand den Trafokern. Der zu messende Leiter ist die Primärwicklung und die Spule im Messgerät die Sekundärwicklung. Der Strom im Leiter magnetisiert den Kern und induziert dadurch in der Sekundärwicklung einen Strom, der proportional zum Leiterstrom ist. Der gemessene Strom der Sekundärwicklung ist proportional zum Eingangsstrom des Verbrauchers. Die über einen Messwiderstand abfallende Spannung kann direkt mit einem Messgerät (z.B. Multimeter oder auch Oszilloskop) ausgewertet werden. In der folgenden Abbildung wird das Prinzip Schaltbild des Stromzangenadapters dargestellt.



Prinzip einer Stromzange



---

Die Empfindlichkeit der Zange ist das Verhältnis der Ausgangsspannung zum Eingangsstrom. Eine Angabe von 10mV/A bedeutet, dass ein Leiterstrom von 10 A eine Ausgangsspannung von 100 mV erzeugt.

Eine Stromzange kann die Stromstärke eines Leiters nur dann messen, wenn dieser einzeln umfasst werden kann. Umschließt die Zange den Leiter und Rückleiter des Verbrauchers, dann werden lediglich nur Leakage Ströme angezeigt. Das Prinzip der Messung eines Leakage Stroms wird u.a. auch in einem Fehlerstrom-Schutzschalter angewendet.

Die Messmethode von reinen Übertragerstromzangen basiert auf dem Induktionsgesetz und können daher nur für Wechselstrom eingesetzt werden. Für die Messung von Gleichstrom muss das Magnetfeld mit Hilfe eines Sensors (z. B. Hallsensor), welcher sich im Luftspalt der Messzange befindet, gemessen werden.



## 2.2 Aufbau der Elektronenstrahlröhre (Braunsche Röhre)

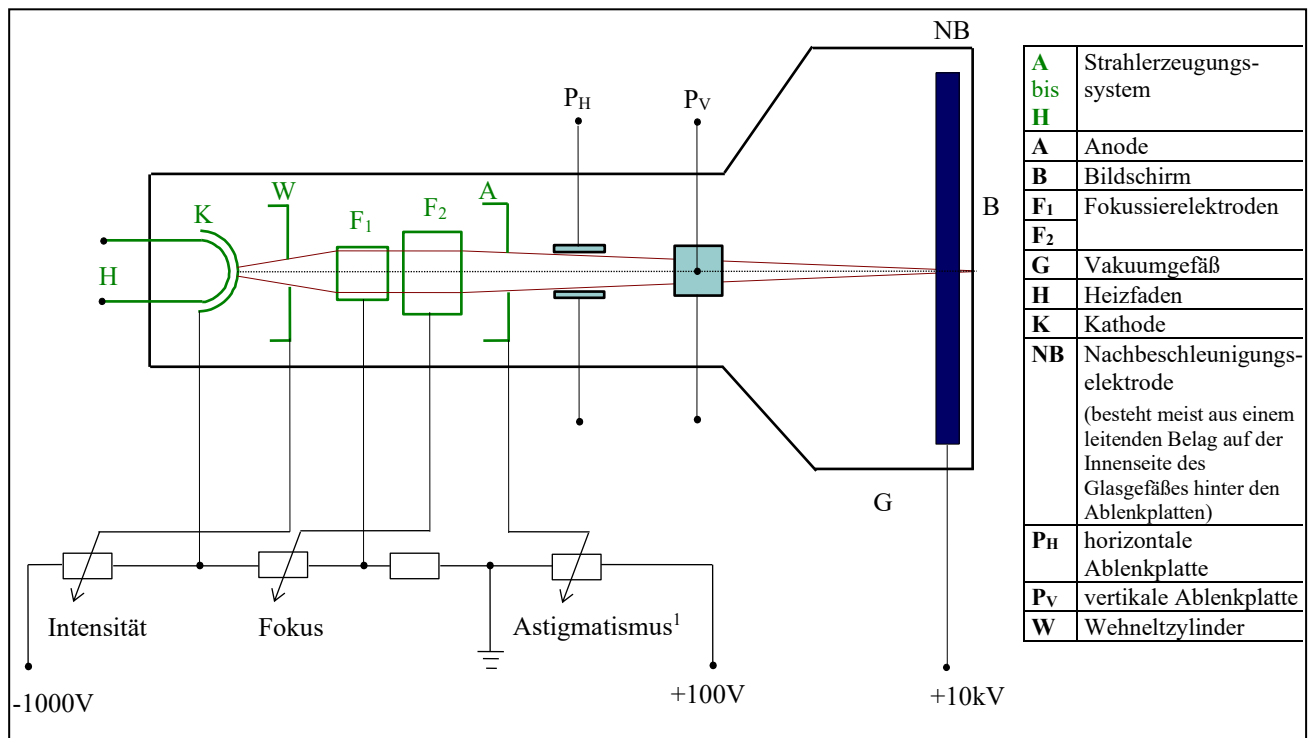
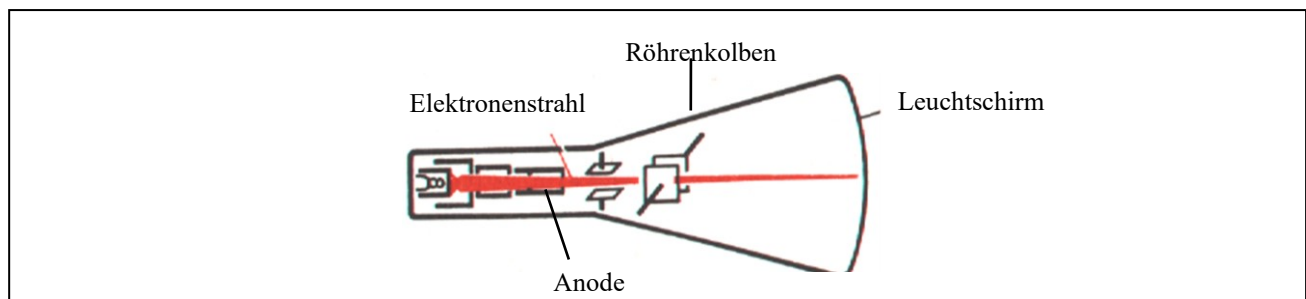
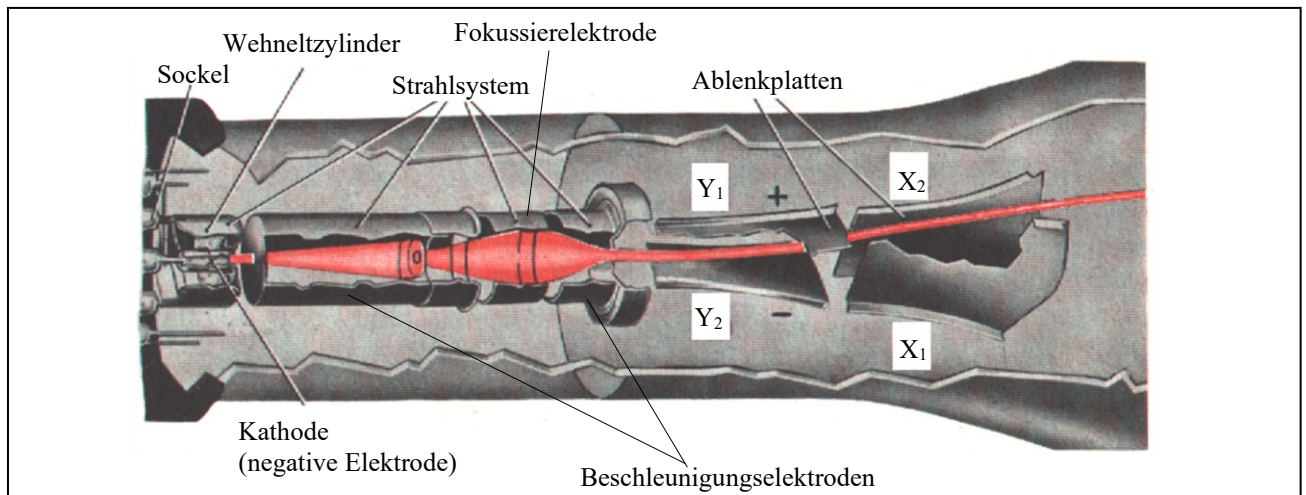


Abb. 3.2 Elektronenstrahlröhre

<sup>1</sup>: Erläuterung siehe Fussnote auf der Folgeseite

Die Elektronenstrahlröhre ist der wichtigste Bestandteil eines Oszilloskops  
 Sie besteht entsprechend Abb. 3.2 im wesentlichen aus:

- einem **Vakuumgefäß G** (meist aus Glas)
- **Strahlerzeugungssystem** (H bis A)
- **horizontalen und vertikalen Ablenkplatten**  $P_H$  und  $P_V$
- **Bildschirm B.**  
 Beim Aufprall des Elektronenstrahls auf den Bildschirm werden Sekundärelektronen frei, die vom Anodenbelag aufgefangen werden.  
 Dadurch ist der Strahlstromkreis geschlossen und der Bildschirm lädt sich nicht negativ auf, obwohl er keine leitende Verbindung mit dem Anodenbelag hat.  
 Die Bauteile einer Elektronenstrahlröhre sind in einen luftleeren Glaskolben eingebaut. Bei Fernsehbildröhren ist die Ablenkeinrichtung außerhalb der Röhre angebracht.

Das Strahlerzeugungssystem besteht aus

- **Heizfaden H**  
 (dient zum Heizen der Kathode, denn erst bei höherer Temperatur (Rotglut) können Elektronen aus der Kathodenoberfläche austreten. Man nennt diesen Vorgang auch Glühemission)
- **Kathode K**
- **Wehneltzylinders ( Gitter 1) W**  
 Die an ihm liegende Spannung steuert die Stärke des Elektronenstroms und damit die Helligkeit auf dem Bildschirm.  
 Außerdem wirkt der Wehneltzylinder als Lochblende für die punktförmige Abbildung des Strahls.
- **Fokussierelektroden**  $F_1$  und  $F_2$   
 Sie befinden sich nach dem Wehneltzylinder.  
 Sie beschleunigen und fokussieren (bündeln) den Elektronenstrahl.  
 Die an Hochspannung liegende Anode ist in zwei Zylinder geteilt. Dazwischen liegt an niedriger Spannung die Fokussierelektrode. Bei Fernsehbildröhren liegt zwischen Wehneltzylinder und Anode noch eine weitere Beschleunigungselektrode
- **Anode A**

weitere Bauelemente der Elektronenstrahlröhre

- **Nachbeschleunigungselektrode NB**  
 Sie besteht aus einem unter Hochspannung stehenden leitenden Innenbelag einer Elektronenstrahlröhre.  
 Er dient zur Nachbeschleunigung des Elektronenstrahls und zur Aufnahme der Sekundärelektronen, die von der Leuchtschicht abgegeben werden

### 2.3 Funktionsweise der Elektronenstrahlröhre

Im Strahlerzeugungssystem wird ein Elektronenstrahl erzeugt und so gebündelt, dass er auf dem mit einer fluoreszierenden Schicht belegten Bildschirm einen Lichtpunkt erzeugt.

Legt man an die horizontalen Ablenkplatten  $P_H$  eine Ablenkspannung an, so wird der Elektronenstrahl und damit auch der Lichtpunkt in horizontaler Richtung abgelenkt. Entsprechend kann mit Hilfe der vertikalen Ablenkplatten  $P_V$  eine Vertikalablenkung erfolgen. Auf diese Weise lassen sich auf dem Bildschirm Kurvenzüge darstellen.

Das Strahlerzeugungssystem besteht zunächst aus einer Kathode K, die mit Hilfe eines Heizfadens H erhitzt wird und dadurch Elektronen emittiert.

Mit Hilfe des Wehneltzylinders W wird ein Elektronenstrahl ausgeblendet. Die Elektronen werden durch positive Vorspannungen an den Fokussierelektroden  $F_1$  und  $F_2$  sowie an der Nachbeschleunigungselektrode zum Bildschirm hin beschleunigt. Dabei haben sie zunächst, wie das Bild verdeutlicht, auch eine radiale, von der Strahlachse wegstrebende Geschwindigkeitskomponente.

Legt man nun an die Fokussierelektrode  $F_2$  ein etwas niedrigeres Potential als an  $F_1$ , so daß  $F_2$  gegenüber  $F_1$  negativ vorgespannt ist, dann wird auf die Elektronen eine abstoßende Wirkung ausgeübt, und sie werden zur Strahlachse hin beschleunigt.

Bei richtiger Einstellung aller Spannungen erreichen die Elektronen die Strahlachse genau am Ort des Bildschirms B, so dass ein scharfer Lichtpunkt entsteht. Die Leuchtspur auf dem Bildschirm ist um so heller und schärfer, je höher die von den Elektronen durchlaufende Gesamtbeschleunigungsspannung ist.

Einer entsprechenden Erhöhung der Beschleunigungsspannung zwischen Kathode K und Anode A steht jedoch entgegen, dass an den Ablenkplatten  $P_H$  und  $P_V$  um so höhere Ablenkspannungen benötigt werden, je höher die Geschwindigkeit der durchfliegenden Elektronen ist. Aus diesem Grunde beschränkt man sich i.a. zwischen Anode und Kathode auf Beschleunigungsspannungen bis maximal 2 kV und bringt bei modernen Elektronenstrahlröhren hinter den Ablenkplatten noch eine Nachbeschleunigungselektrode mit einer Vorspannung zwischen 10 und 20 kV an. Die Nachbeschleunigungselektrode besteht meist aus einem leitenden Belag auf der Innenseite des Glasgefäßes. Der Wehneltzylinder führt gegenüber der Kathode i.a. eine negative Vorspannung. Durch Verändern dieser Vorspannung kann man den Strahlstrom und damit die Bildhelligkeit variieren. Der entsprechende Einstellregler wird mit Intensität (Intensity) bezeichnet. Mit dem Regler Fokus (Focus) wird die Strahlschärfe eingestellt. Manchmal ergibt sich in der Bildmitte ein scharfer Leuchtpunkt, am Bildrand jedoch nicht oder umgekehrt. In diesem Falle kann die Schärfe mit Hilfe des Einstellreglers Astigmatismus<sup>2</sup> (Astigmatism) korrigiert werden, falls ein Solcher vorhanden ist. Man stellt das Bild dabei zunächst mit Astigmatismus gleichmäßig unscharf und dann mit Fokus scharf.

Eine elektrostatische Strahlablenkung hat den Vorteil, daß sie leistungslos erfolgt und hohe Ablenkfrequenzen ermöglicht. Oszilloskopröhren arbeiten deshalb mit elektrostatischer Ablenkung. Nachteilig ist dabei der kleine Ablenkwinkel.

<sup>2</sup> **Astigmatismus:**

[griech.] (Optik) Abbildungsfehler von Linsen, bei dem z.B. als schärfstes Bild eines Punktes ein Strich erscheint und die beiden senkrecht aufeinander stehenden Linien eines Kreuzes in zwei verschiedenen Ebenen scharf abgebildet sind. Der Astigmatismus kann durch ein System von Sammel- und Zerstreuungslinsen, ein sog. Anastigmat, behoben werden.

## 2.4 Bedienung des Oszilloskops

### 2.4.1 Bedienelemente

Einsteller	Funktion
<b>Intensität</b>	Er dient zur Einstellung der Leuchtdichte des Strahls. Meist ist mit ihm auch noch der Netzschalter verbunden. Bei zu großer Leuchtdichte kann der Leuchtschirm durch den Elektronenstrahl beschädigt werden. Der Elektronenstrahl „brennt ein.“
<b>Focus und Astigmatismus</b>	Zur Einstellung der Schärfe des Strahls. Der Elektronenstrahl wird so eingestellt, daß der Brennpunkt auf die Bildschirmebene fällt
<b>Position Horizontal; Position Vertikal</b>	der Anfangspunkt des Strahls wird in waagrechter bzw. in senkrechter Richtung verschoben
<b>Illumination<sup>3</sup></b>	Mit ihm läßt sich ein Raster vor dem Bildschirm aufhellen. Dadurch kann das Oszillogramm leichter ausgemessen werden

Schalter	Funktion
<b>DC, GND, AC</b>	Es ist der Eingangsumschalter für den Y - Verstärker: Stellung <b>DC</b> ist für Gleichspannungsmessungen, <b>AC</b> für Wechselspannungsmessungen. Bei <b>GND</b> (Ground) ist der Eingang mit der Masse verbunden

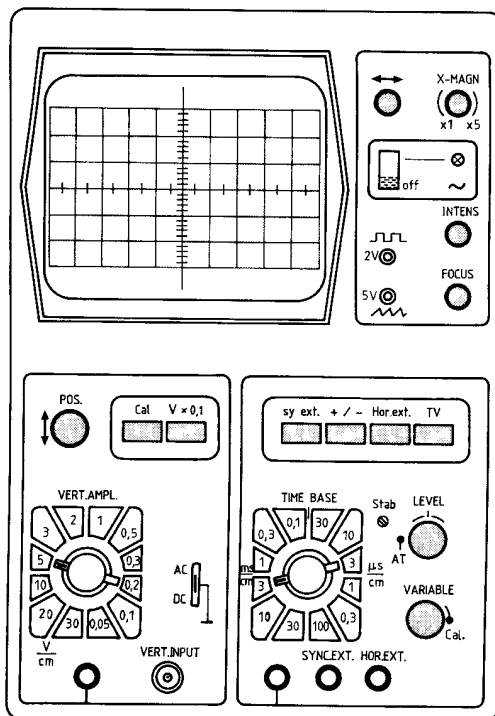


Abb. 3.3 Frontplatte  
(Bedienfeld) eines Oszilloskops

<sup>3</sup> **Illumination**, die; -, -en [frz. illumination < lat. illuminatio = Erleuchtung, Beleuchtung]:

---

**2.4.2 Bedienungshinweise**

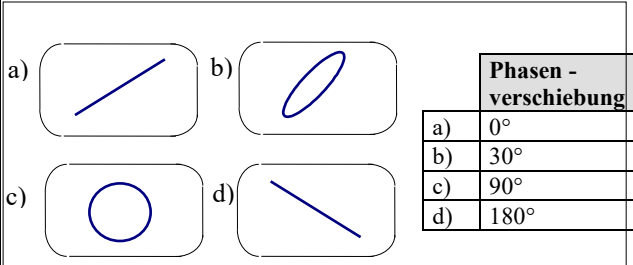
<b>Zeitablenkung beim Triggerbetrieb</b>	Der Ablenkgenerator wird durch einen Impuls ausgelöst. Der Impuls wird von einem Schwellwertschalter erzeugt, sobald die Meßspannung einen bestimmten Wert erreicht hat. Die Auslösespannung ist einstellbar (TRIGGER-NIVEAU).
<b>Zeitablenkung bei der Synchronisierung</b>	Der Ablenkgenerator läuft freischwingend. Seine Frequenz wird so eingestellt (TIME oder SYNCHR.), dass die Messfrequenz ein ganzzahliges Vielfaches der Ablenkfrequenz ist
<b>Vorteil der Triggerung eines Oszilloskops im Vergleich zur Synchronisation</b>	Bei der Triggerung entsteht auch dann ein stehendes Bild, wenn die Frequenz der Messspannung schwankt
<b>Bewegung des Elektronenstrahls auf dem Leuchtschirm, wenn nur die Zeitablenkung eingeschaltet ist.</b>	Der Elektronenstrahl läuft langsam von links nach rechts und schnell von rechts nach links zurück. Während der Rückführung ist der Strahl nicht sichtbar. Der Strahlstrom wird in dieser Zeit gesperrt.

## 2.5 Messungen mit dem Oszilloskop

### 2.5.1 Messarten

Messungsvorgang	Hinweise
<b>Wechselspannung</b>	<p>Die X - Ablenkung wird abgeschaltet, so dass auf dem Bildschirm nur ein senkrechter Strich geschrieben wird. Das Produkt aus Strichlänge und Ablenkfaktor ist der Spitze - Spitze - Wert <math>U_{ss}</math> der Messspannung.</p> <p>Der Ablenkfaktor ist am Knopf bzw. im Bildschirm für die Y- Verstärkung angegeben (<math>\text{Volt/DIV} = \text{Volt je Teileinheit des Rasters}</math>). Die Angabe gilt nur, wenn der Feineinsteller für die Verstärkung auf Null oder CAL (kalibriert) steht.</p>
<b>Ströme</b>	<p>Eine direkte Strommessung ist nicht möglich. Gemessen wird der Spannungsabfall an einem Hilfswiderstand.</p> <p>Die Stromstärke muß anschließend durch Rechnung ermittelt werden <math>I = \frac{U}{R_H}</math></p>
<b>Frequenzmessung</b>	<p>Das Oszilloskop wird auf Triggerung geschaltet. Am Wahlschalter für die Zeitablenkung wird der Zeitmaßstab abgelesen; dies ist die Zeit die der Elektronenstrahl für eine Teileinheit des Rasters benötigt (<math>\text{TIME/DIV}</math>). Damit kann man die Periodendauer der abgebildeten Wechselspannung ermitteln.</p> <p>Bei Synchronisierbetrieb muss man die Zahl der abgebildeten Perioden auszählen und mit der Ablenkfrequenz multiplizieren.</p>



<p><b>Phasenverschiebung zwischen zwei Wechselspannungen</b> (mit einem Einstrahl - Oszilloskop gemessen)</p>	<p>Man schaltet die Zeitablenkung ab und legt die eine Spannung an den Y- Eingang , die andere an den X- Eingang. Auf dem Bildschirm zeigen sich sogenannte Lissajous - Figuren (siehe auch Kapitel „Der Abbildungsvorgang“), aus denen man die Phasenverschiebung ermitteln kann.</p> <p>Die einfachsten Figuren (Strich, Ellipse oder Kreis) ergeben sich bei zwei gleichen Frequenzen)</p> <div data-bbox="755 598 1383 955">  <table border="1" data-bbox="1169 651 1383 829"> <thead> <tr> <th></th><th>Phasen - verschiebung</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>a)</td><td>0°</td></tr> <tr> <td>b)</td><td>30°</td></tr> <tr> <td>c)</td><td>90°</td></tr> <tr> <td>d)</td><td>180°</td></tr> </tbody> </table> </div> <p>Abb. 3.4</p> <p>Lissajous - Figuren bei <u>frequenzgleichen</u> Spannungen</p>		Phasen - verschiebung	a)	0°	b)	30°	c)	90°	d)	180°
	Phasen - verschiebung										
a)	0°										
b)	30°										
c)	90°										
d)	180°										

#### 2.5.2 allgemeine Hinweise (siehe auch Kapitel Standard - Oszilloskope)

	Hinweise
<b>Tastkopf</b>	<p>Es ist zweckmäßig, beim Oszilloskopieren einen Tastkopf zu benutzen, weil Tastköpfe einen Spannungsteiler enthalten, da die Messspannung für den Eingang des Oszilloskops oft zu groß ist.</p> <p>Außerdem werden Störeinflüsse verhindert, da Tastköpfe über abgeschirmte Leitungen angeschlossen sind.</p>
<b>Zweikanal - bzw. Zweistrahl - Oszilloskope</b>	<p>Man verwendet sie zur vergleichenden Darstellung zweier Spannungen, z. B zur Sichtbarmachung einer Phasenverschiebung.</p>
<b>Unterschied zwischen einem Zweikanal - Oszilloskop und einem Zweistrahl - Oszilloskop</b>	<p>Ein Zweistrahl - Oszilloskop besitzt eine Zweistrahl - Röhre mit zwei Strahlsystemen. Ein Zweikanal - Oszilloskop enthält eine Einstrahl - Röhre und einen elektrischen Umschalter.</p> <p>Für den Benutzer ist bei den meisten vorkommenden Messungen der Unterschied nicht merkbar.</p>

Betriebsarten <b>chopped</b> bzw. <b>alternative</b> bei einem Zweikanal - Oszilloskop	Bei „chopped“ kann man tiefe Signalfrequenzen darstellen, mit „alternativ“ dagegen hohe.
--	--

## 2.6 Der Abbildungsvorgang

### 2.6.1 Darstellung periodischer Zeitfunktionen $u_y(t)$

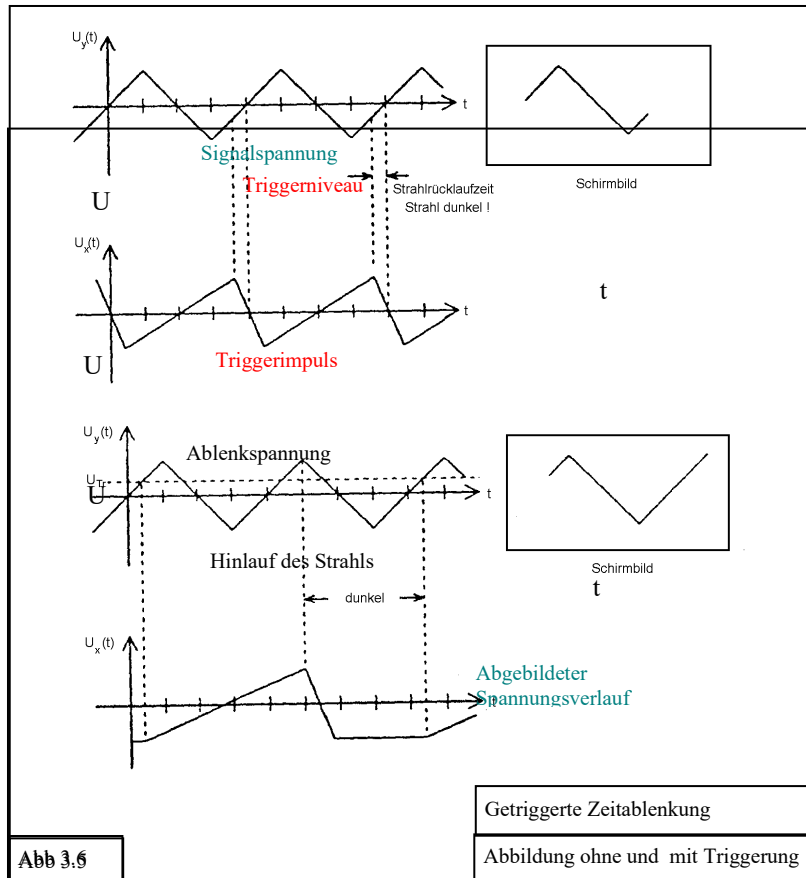
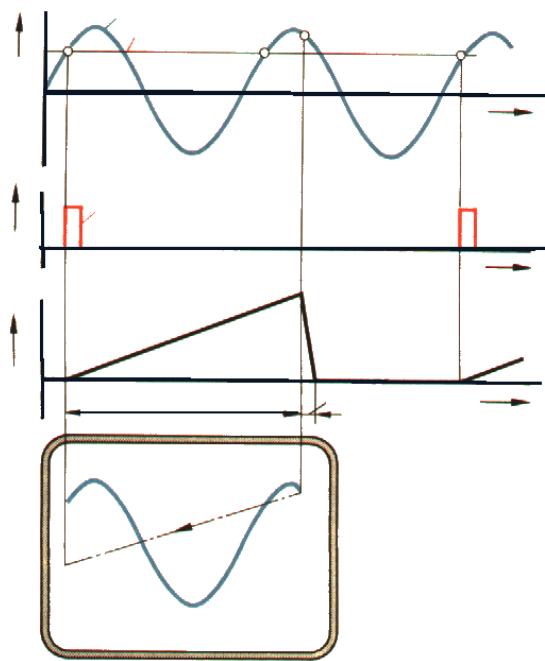


Abb 3.6

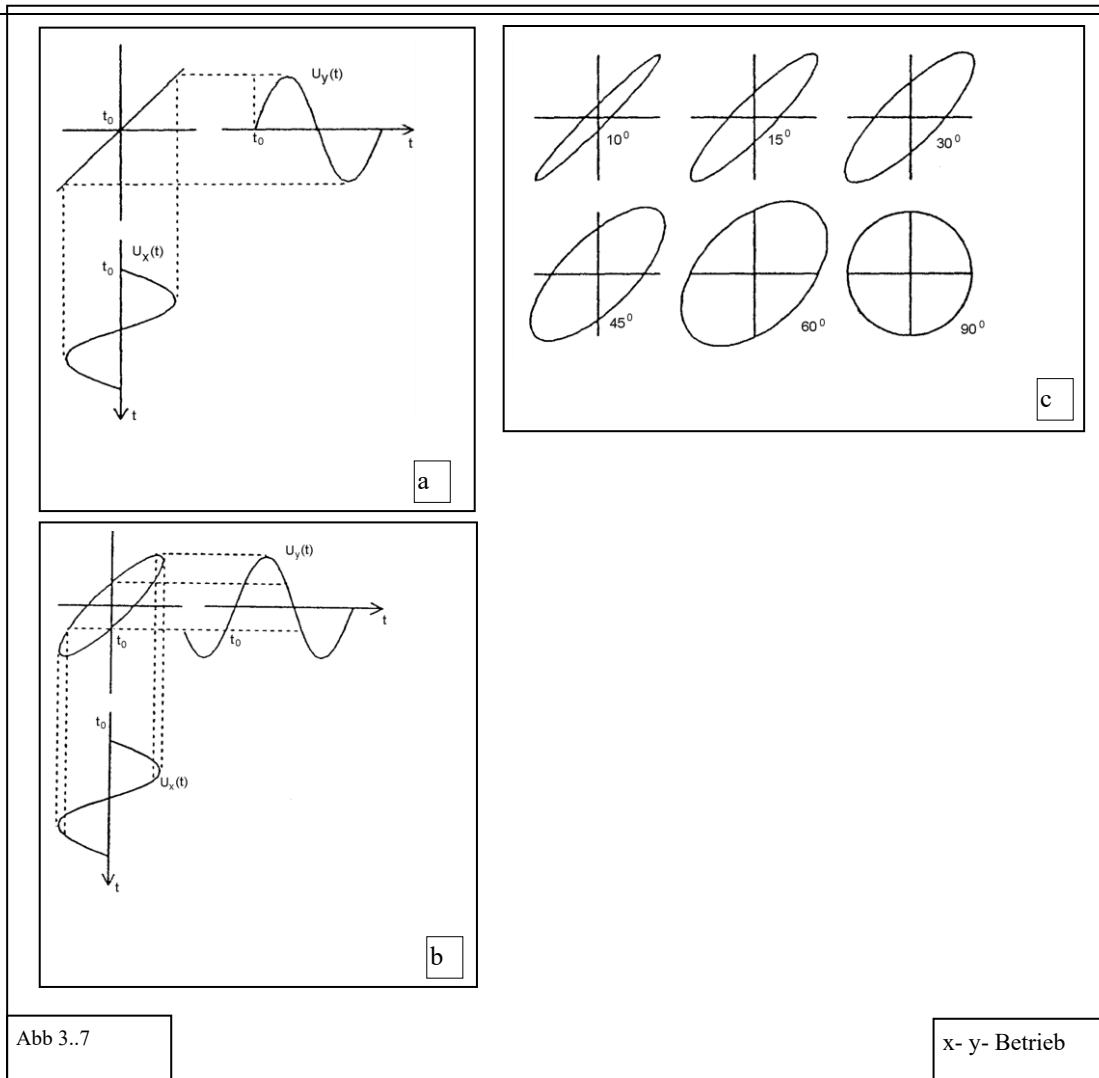


Die Abbildung 3.5 veranschaulicht, wie auf dem Bildschirm ein periodischer Vorgang  $u_y(t)$  sichtbar gemacht werden kann. Hierfür wird  $u_y(t)$  an die Vertikalablenkungsplatten gelegt und an die Horizontalablenkungsplatten eine zeitproportional anwachsende Spannung  $u_x(t)$  gelegt, so dass der Leuchtpunkt vom linken Bildrand mit konstanter Geschwindigkeit über den Bildschirm geführt wird. Infolge der gleichzeitig auftretenden Vertikalablenkung durch  $u_y(t)$  entsteht dann auf dem Bildschirm ein Abbild der Zeitfunktion  $u_y(t)$ . Ist der rechte Bildrand erreicht, so muß  $u_x(t)$  möglichst schnell auf den Anfangswert zurück gesteuert und der Leuchtpunkt dadurch wieder auf den Anfangspunkt des Bildschirms zurückgesetzt werden. Diesen Vorgang nennt man Strahlrücklauf. Während des Strahlrücklaufs wird der Strahlstrom so weit reduziert, dass der Rücklauf unsichtbar bleibt. Das nächste Bild muß nun wieder an genau der gleichen Stelle des periodischen Vorgangs  $u_y(t)$  bezüglich der Periode begonnen werden, denn andernfalls könnte kein stehendes Bild entstehen, die Abbildung würde „weglaufen“. Es ist daher erforderlich, die Horizontalablenkung genau mit der Periodendauer von  $u_y(t)$  zu synchronisieren; hierfür muss dann ein entsprechender Einstellregler „Synchronisation“ vorhanden sein. Dieses Synchronisierungs- Verfahren hat einen schweren praktischen Nachteil: Da die Horizontal - Ablenkgeschwindigkeit für jeden darzustellenden Vorgang individuell von Hand eingestellt werden muß, läßt sich die x- Achse nicht mit einer Zeitskalierung versehen. Dies wäre aber sehr wünschenswert, damit man z.B. Periodendauern oder Zeitdifferenzen im Bild direkt ablesen kann. Aus diesem Grunde wird bei fast allen modernen Oszilloskopen statt des Synchronisierung -Verfahrens das Trigger- Verfahren<sup>4</sup> nach Abb 3.5 unten angewandt. Die Horizontal - Ablenkspannung wird immer genau dann gestartet, wenn das abzubildende periodische Signal  $u_y(t)$  einen ganz bestimmten vorab eingestellten Spannungswert  $U_{Tr}$ , den sogenannten Trigger-Pegel (Trigger- Level ) durchläuft. Die Horizontalablenkung kann dann mit einer vom Vorgang unabhängigen, kalibriert einstellbaren Geschwindigkeit ablaufen. Ist die Bildbreite durchlaufen, so wird der Strahl wieder dunkelgesteuert auf den Anfangspunkt zurückgesetzt und eine Pause eingelegt, bis wieder der geeignete Startmoment erreicht ist. Ein derartiges Trigger System enthält i.a. folgende Einstellregler bzw. Einstellschalter:

---

<sup>4</sup> **Trigger** [engl. = Auslöser], [elektron.] Bauteil zum Auslösen eines Vorgangs; Zünd-, Auslösevorrichtung; auch Bez. für das auslösende Signal (z. B. ein Impuls).

- 
1. **Niveau (Level):** Hier wird der Wert des Trigger - Niveaus  $U_{Tr}$  eingestellt, bei dem die Zeitablenkung und damit das Bild einsetzen soll. Erreicht der Vorgang  $u_y(t)$  das Trigger - Niveau nicht, dann bleibt der Strahl stets dunkelgesteuert.
  2. **Flanke (Slope):** Man sieht in Abb 3.5 unten, daß ein eingestelltes Trigger - Niveau  $U_{Tr}$  mit der abzubildenden Funktion  $u_y(t)$  innerhalb jeder Periode jeweils zwei Schnittpunkte ergibt, einen im ansteigenden Teil (+) und einen im fallenden Teil (-) einer Halbschwingung. Mit Hilfe des Schalters Flanke wird der Trigger - Schaltung dann zusätzlich angegeben, ob die Zeitablenkung im Bereich der ansteigenden oder der abfallenden Flanke einsetzen soll. Dieser Schalter ist demnach in der Regel nur mit + oder - beschriftet; er kann auch mit anderen Schalterfunktionen kombiniert sein.
  3. **Stabilität (Stability):** Dieser Regler ist nicht immer vorhanden. Falls ja, ist er so einzustellen, daß die Zeitablenkung gerade noch nicht unabhängig vom abzubildenden Vorgang einsetzt. Ist der Stabilitätsregler „überdreht“, so entsteht kein stehendes Bild mehr. Man nennt diese Betriebsart Freilauf (free run). Diese Einstellmöglichkeit kann auch mit anderen Einstellreglern kombiniert sein.
  4. **Automatik (Automatic):** Zu Beginn einer Messung ist man sich nicht immer gleich darüber klar, ob der Verstärkungsfaktor des Gerätes so eingestellt ist, dass das Trigger- Niveau  $U_{Tr}$  tatsächlich erreicht werden kann. Für diesen Fall enthalten die meisten Oszilloskope eine Automatik - Schaltung, die zunächst sicherstellt, daß erst einmal überhaupt ein orientierendes Bild erscheint. Nachdem alle vorbereiteten Einstellungen erledigt sind, geht man dann zur normalen Niveau - Triggerung über.



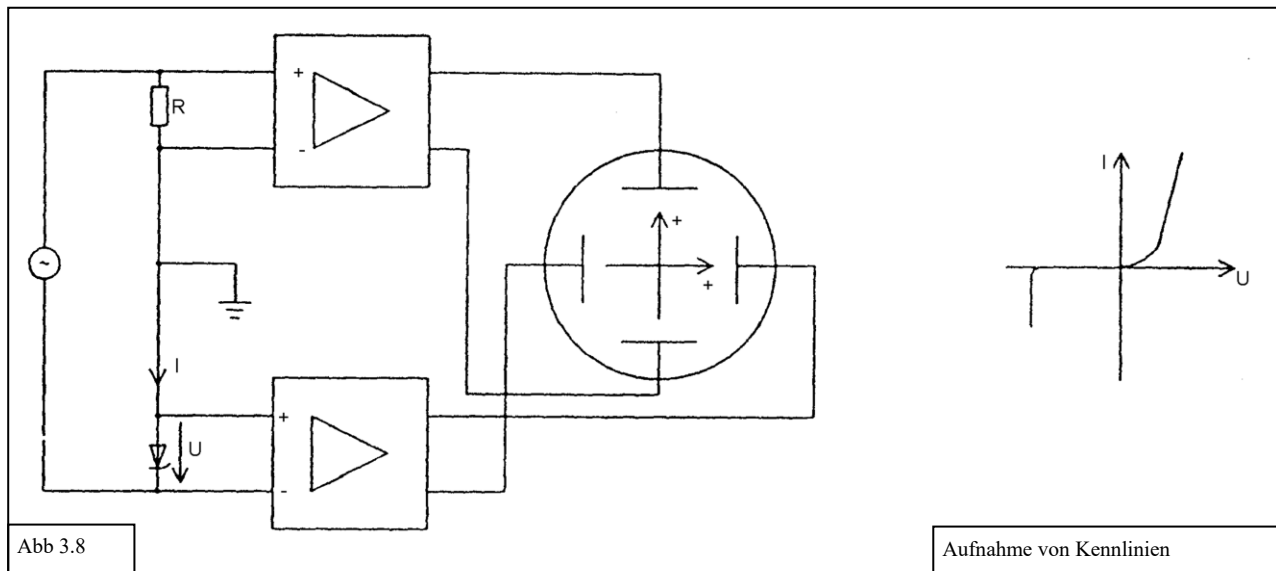
Falls man nicht, wie zuvor betrachtet, eine Zeitfunktion  $u_y(t)$  abbilden möchte, sondern irgendeinen Zusammenhang  $y = f(x)$ , so kann man den Ablenkplatten entsprechend beliebige Funktionen  $u_y(t)$  und  $u_x(t)$  zuführen, so dass auf dem Bildschirm eine Darstellung von  $u_y(t)$  über  $u_x(t)$  erscheint (x - y - Betrieb). Folgende Beispiele kommen dabei in der Praxis besonders häufig vor: Legt man an die x- und die y- Platten gleichfrequente und gleichphasige Sinus Schwingungen mit gleicher Amplitude, so erscheint auf dem Bildschirm entsprechend Abb 3.7 a eine unter  $45^\circ$  schräg liegende Gerade. Haben die Sinus Schwingungen gleiche Frequenz und Amplitude, aber unterschiedliche Phasenlage, so verformt sich die Gerade zu einer Ellipse (Abb 3.7 b). Bei genau  $90^\circ$  Phasenverschiebung ergibt sich ein Kreis. Eine weitere Erhöhung der Phasenlage ergibt Ellipsen, bis bei  $180^\circ$  Phasenverschiebung wieder eine Gerade entsteht, diesmal allerdings senkrecht zur vorherigen Gerade. (Abb 3.7 c).

### Lissajous - Figuren<sup>5</sup>

Legt man an die y - Platten eine Sinus Schwingung anderer Frequenz als an den x - Platten, entstehen sogenannte Lissajous - Figuren , aus denen man mit entsprechender Erfahrung das Frequenzverhältnis der Spannungen an den beiden Plattenpaaren ablesen kann.

<sup>5</sup> **Lissajous - Figuren** [lisa'ʒu - nach dem französischen Physiker J. A. Lissajous, \* 1822 , † 1880]

Kurven, die sich beim Überlagern linearer Schwingungen verschiedener Frequenz ergeben



Mit dem x - y - Betrieb lassen sich auch Kennlinien elektronischer Bauelemente aufnehmen, z.B. die Kennlinie einer Zener - Diode nach Abb 3.8 . Die quadratischen Blöcke sind Symbole für die im Oszilloskop vorhandenen Verstärker; man überlege sich die Bedeutung der eingetragenen Vorzeichen!

## 2.7 Standard - Oszilloskope

In diesem Kapitel werden die üblichen Eigenschaften eines Oszilloskops kurz beschrieben. Natürlich wird die y- Eingangsspannung normalerweise nicht direkt an die Vertikalablenkplatten angelegt, sondern über einen Vertikalverstärker geführt, damit auch kleine Signale auf den für die Strahlablenkung erforderlichen Spannungspegel verstärkt werden können. Mit Hilfe eines umschaltbaren Spannungsteilers, kurz Abschwächer genannt, kann man eine Anpassung an verschiedene Spannungspegel vornehmen. Am Eingang wird in Schalterstellung DC(Direct Current) der Gleichspannungsanteil eines zu beobachteten Signals mit übertragen, in Stellung AC(Alternating Current) nur der Wechselspannungsanteil. Die Einstellung AC benötigt man, wenn man kleine Wechselspannungen darstellen will, die einer hohen Gleichspannung überlagert sind. Die entsprechende AC-DC- Wahlmöglichkeit besteht auch am x - Eingang und am Trigger - Eingang. Außerdem kann i.a. jeder Eingang auf Null (GND) geschaltet werden, um z.B. die Punktlage bzw. Strahllage zu kontrollieren. Der Horizontalverstärker kann entweder an die Zeitablenkschaltung (Intern) oder an die x - Eingangsklemmen (Extern)angeschaltet werden. Das Trigger- System kann entweder vom Vertikalverstärker her gesteuert werden (Intern), wie meist gebräuchlich, oder auch von nach Belieben von einer externen Triggerquelle (Extern) oder auch von der Netzfrequenz (Netz, Linie), die ja innerhalb des Gerätes zur Verfügung steht. Da das Trigger System nicht beliebig schnell arbeiten kann, vergeht zwischen dem Augenblick, in dem der abzubildende Vorgang  $u_y(t)$  das Trigger - Niveau  $U_{tr}$  durchläuft und dem Einsetzen der Zeitablenkspannung eine kleine Verzögerungszeit. Damit nun der in diese Verzögerungszeit hineinfallende Teil von  $U_y(t)$  nicht verloren geht, enthalten hochwertige Oszilloskope im Vertikal- kanal noch eine Verzögerungsleitung. Hier wird das y- Signal so verzögert, dass es an den y- Platten erst dann eintritt, wenn auch die zugehörige Zeitablenkspannung bereits vorhanden ist.

### 2.7.1 Zweistrahl - Oszilloskope

Sehr oft möchte man auf dem Bildschirm eines Oszilloskops zwei verschiedene Vorgänge gleichzeitig darstellen, um sie miteinander vergleichen zu können, z. B. die Eingangsspannung und die Ausgangsspannung irgendeiner Übertragungsschaltung. Diese Aufgabe erfüllt das Zweistrahl - Oszilloskop. Es enthält eine Zweistrahlröhre, die zwei voneinander unabhängige Strahlerzeugungssysteme mit jeweils zugehörigen y- Ablenkplattenpaaren sowie einem x- Ablenkplattenpaar, das auf beide Elektronenstrahlen einwirkt. Dementsprechend enthält ein damit aufgebautes Oszilloskop zwei voneinander völlig unabhängige y - Verstärker, aber nur einen x- Verstärker mit der zugehörigen Zeitablenkeinrichtung, die dann wahlweise von Kanal A, Kanal B oder extern getriggert werden kann.

### 2.7.2 Zweikanal – Oszilloskope

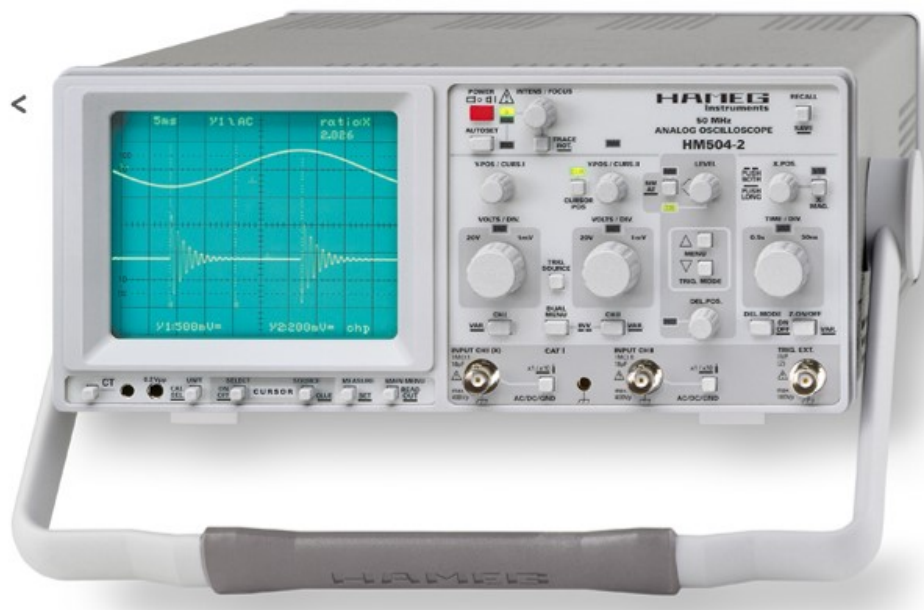


Abb. 3.9 Zweikanal - Oszilloskop

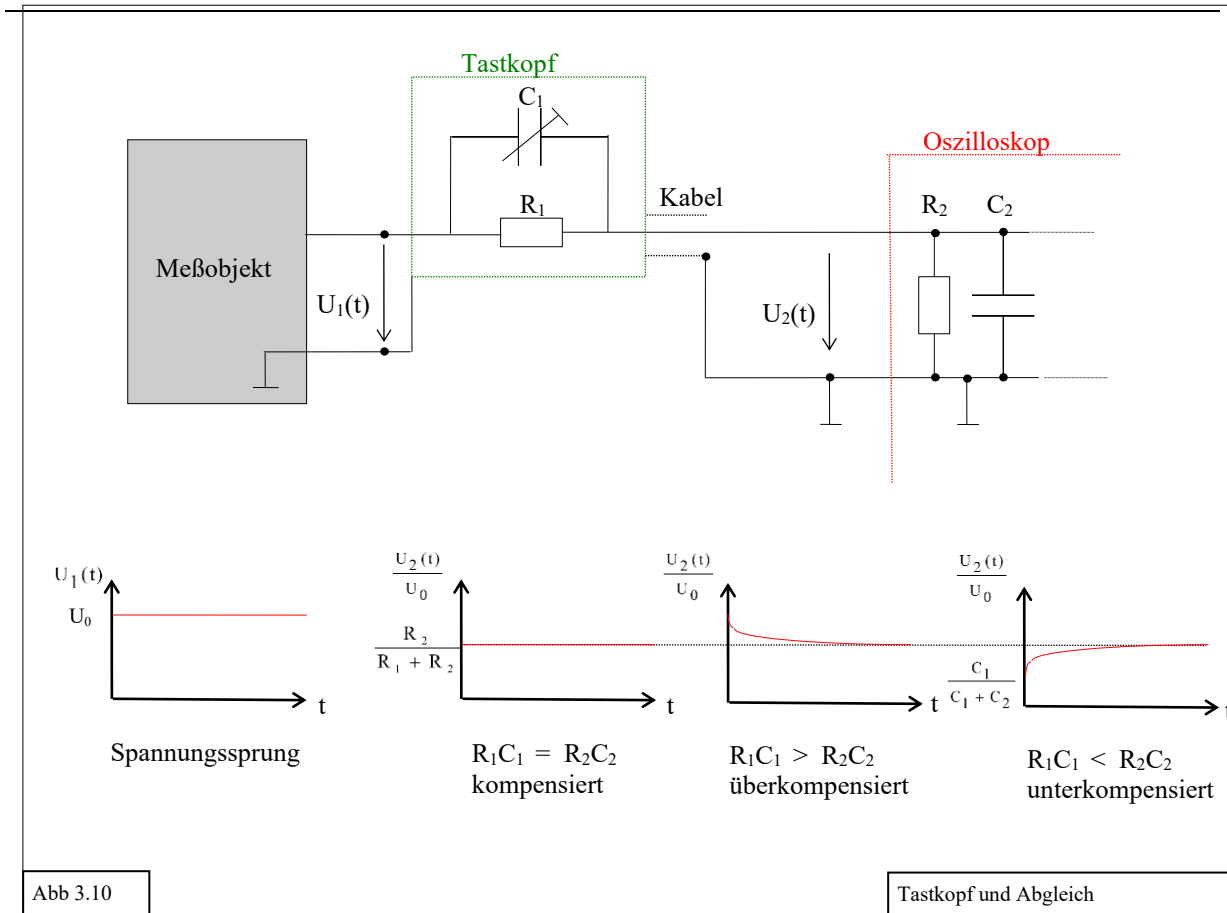
Gewöhnlich sind die Oszilloskope nur mit einem Strahlerzeugungssystem ausgerüstet, was wesentlich preiswerter ist. Um auch mit diesen Geräten zwei Vorgänge gleichzeitig darstellen zu können, sind diese Geräte mit einem sehr schnell schaltbaren elektronischen Umschalter ausgerüstet, der die Signale von zwei getrennten y - Vorverstärkern an den einen vorhandenen y - Endverstärker wechselseitig durchschaltet. Dabei muss zwischen zwei verschiedenen Betriebsarten unterschieden werden, die maßgeblichen Einfluss auf das Aussehen des Schirmbildes haben können:



- 
1. Chopper- Betrieb: Bei dieser Betriebsart werden die von den beiden y - Eingängen kommenden Signale mit einer hohen Frequenz, der sogenannten chopper - Frequenz abwechselnd auf den y - Endverstärker durchgeschaltet (gechopped). Die Eingangssignale werden dabei zerhackt. Der Elektronenstrahl springt also ständig hin - und her und wird beim Wechsel natürlich dunkel geschaltet. Die Signale erscheinen gleichzeitig auf dem Bildschirm. Wenn allerdings die Signalfrequenzen der y - Eingänge sich der chopper - Frequenz nähern, sieht die Bildschirmdarstellung zunehmend zerhackt aus. Dann schaltet man um auf den alternierenden Betrieb.

Zum Chopper - Betrieb ist noch anzumerken, dass aufgrund des am Ausgang des Umschalters vorhandenen Signalgemisches mit den Umschaltspürungen eine einwandfreie Triggerung nur möglich ist, wenn man auf eines der beiden Eingangssignale vor dem Umschalter triggern kann. Falls dies nicht möglich ist, lässt sich eine fehlerfreie Triggerung mit dem externen Trigger - Eingang erreichen.

1. Alternierender- Betrieb: Hierbei werden die beiden Vorgänge jeweils für einen Strahldurchlauf auf dem Schirm dargestellt und dann umgeschaltet. Probleme mit zerhacktem Aussehen gibt es nicht, allerdings erscheinen die Signale nicht mehr gleichzeitig auf dem Schirm! Sie besitzen eine Phasenverschiebung von einer Strahldurchlaufzeit zueinander.



Um beim Messen störende Einflüsse auszuschalten, verwendet man abgeschirmte Koaxialkabel<sup>6</sup>. Diese Kabel besitzen eine Kapazität von etwa 60 pF/m, die das Messobjekt belasten. Der Verstärker - Eingang eines Oszilloskops ist ebenfalls mit gewissen Kapazitäten behaftet, die zu dem ohmschen Eingangswiderstand  $R_2$  parallel liegen. Die Kapazität des Kabels und des Verstärkereingangs beträgt zusammen etwa 100 pF. Sie wird im Ersatzschaltbild in Abb. 3.10 in  $C_2$  berücksichtigt. Durch die kapazitive Belastung des Messobjektes können erhebliche Messfehler auftreten; so wird z. B. die Resonanzfrequenz eines Schwingkreises durch den Messvorgang verschoben. Um den Einfluss der störenden Kapazität  $C_2$  zu verringern, schaltet man einen großen Widerstand  $R_1$  vor. Die Spannungsteilung, die dadurch entsteht, nimmt man in Kauf. Sie lässt sich am y - Verstärker wieder ausgleichen. Allerdings ist der Spannungsabfall über  $R_1$  frequenzabhängig, weil der Kondensator  $C_2$  (frequenzabhängiger Blindwiderstand!) über  $R_1$  auf - bzw. umgeladen wird. Dabei entsteht eine u. U. erhebliche Verfälschung des Eingangssignals.

<sup>6</sup> **Koaxialkabel** (Koaxialleitung), elektr. Doppelleitung zur Übertragung hochfrequenter Signale; bestehend aus einem isolierten Innenleiter in der Achse eines schlauchförmigen Außenleiters (Drahtgeflecht); dient z. B. als Antennenkabel. Das ISDN wird weitestgehend über K. realisiert.

Spannungssprünge (Rechtecksignale!) kann nicht mehr schnell genug gefolgt werden, die Flanken werden "verschliffen".

Um diese unerwünschte Erscheinung zu kompensieren, schaltet man parallel zu  $R_1$  eine (mit Schraubendreher o.Ä.) einstellbare Kapazität  $C_1$ . Wenn die sogenannte Abgleichbedingung<sup>7</sup>

$$R_1 \cdot C_1 = R_2 \cdot C_2$$

erfüllt ist, beträgt der Spannungsteiler am Tastkopf

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

und ist damit frequenzunabhängig. Dieser Spannungsteiler ist auf dem Tastkopf meist aufgedruckt

(1:10 oder 1:100) und muss natürlich beachtet werden.

**Achtung:** Umschaltbare Tastköpfe (1:1, 1:10) haben, in der Stellung 1:1 betrieben, zwar keinen Spannungsabfall, allerdings kommt dann die störende Kapazität  $C_2$  wieder zum Tragen!

### 2.7.3 Speicher - Oszilloskope

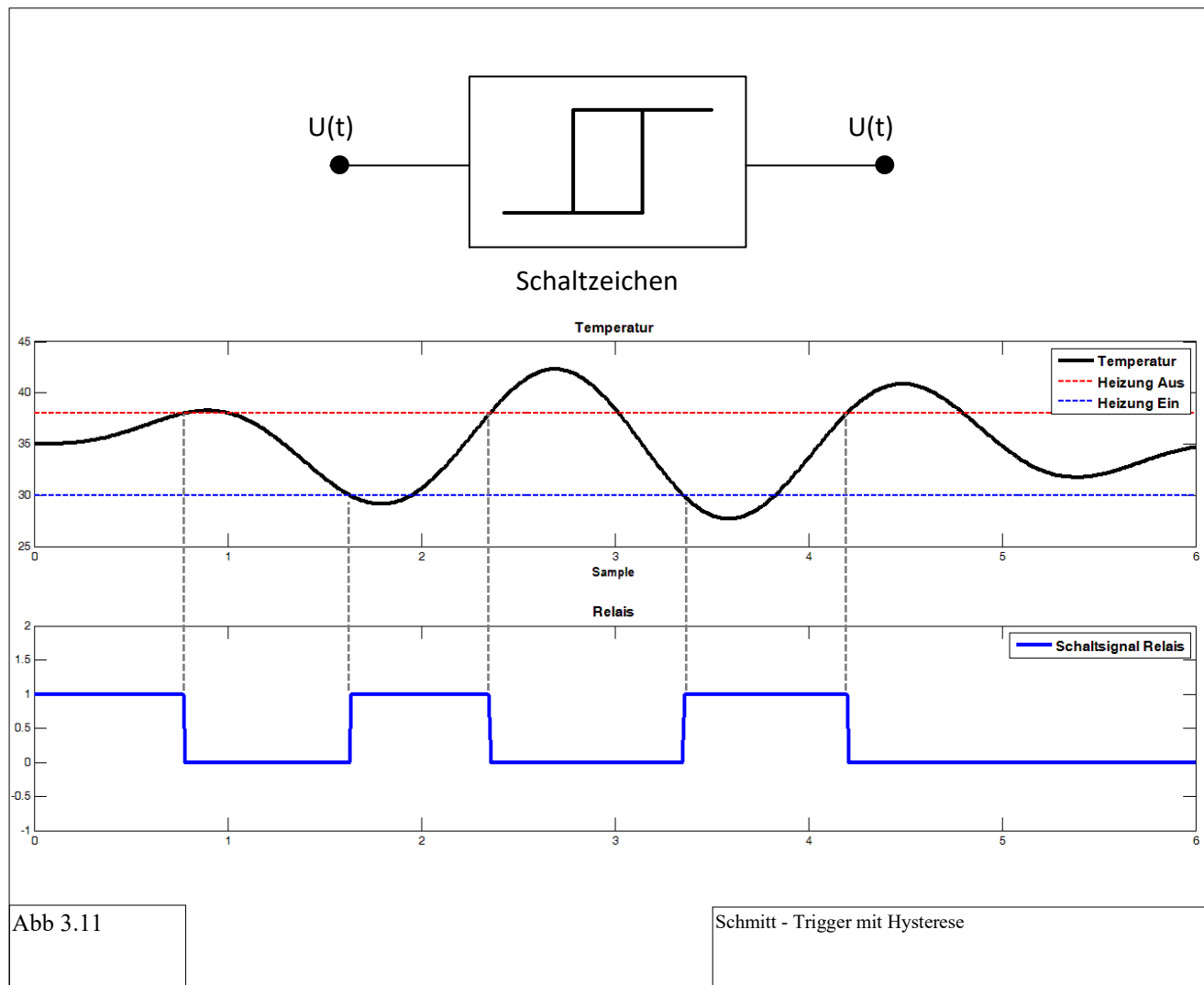
Man benötigt sie für Messungen bei einmaligen, schnell ablaufenden Vorgängen und für sehr langsame Vorgänge

Bei langsamen Vorgängen sieht man sonst nur einen Punkt über den Bildschirm wandern. Schnelle Vorgänge, z. B. Stoßimpulse, sind sonst auf dem Bildschirm überhaupt nicht zu erkennen.

---

<sup>7</sup> **Abgleich** in der Elektronik Einstellen auf einen vorgeschriebenen Wert (Frequenz, Ausschlag usw.) mittels veränderlichen Spulen und Widerständen, sowie Dreh- oder Abgleichkondensatoren bzw. Trimmern.

## 2.8 Schmitt - Trigger



Ein Schmitt - Trigger ist eine elektronische Schaltung mit folgender Eigenschaft: Legt man an die Eingangsklemmen eine zeitlich veränderliche Spannung an, so geht die Ausgangsspannung immer sprunghaft von einem unteren Ruhewert auf einen oberen Ruhewert über, wenn die Eingangsspannung einen bestimmten EinschaltSchwellwert  $U_{\text{Ein}}$  überschreitet, siehe Abb. 3.11 . Unterschreitet die Eingangsspannung einen bestimmten Ausschaltpegel  $U_{\text{Aus}}$ , dann springt die Ausgangsspannung wieder zurück. Legt man an den Eingang beispielsweise eine sinusförmige Wechselspannung an, dann erscheint am Ausgang eine Rechteckspannung . Die Differenz

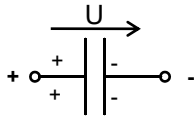
$$U_{\text{Ein}} - U_{\text{Aus}}$$

wird Schalthysterese genannt.

### 3 Versuch 3- Kondensator und Spule

#### 3.1 Kondensator

##### 3.1.1 Zusammenhang zwischen Ladung und Spannung



Der Kondensator dient zur Speicherung von elektrischer Energie.

Der Zusammenhang zwischen anliegender Spannung  $U$ , Kapazität  $C$  und Ladung  $Q$  wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$Q = C \cdot U$$

Die gespeicherte Energie  $W_{el}$  berechnet sich zu:

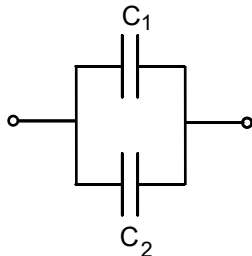
$$W_{el} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

In der folgenden Tabelle sind diese wichtigen Zusammenhänge noch einmal dargestellt:

Formel	Bedeutung	Einheit
$Q = C \cdot U$	im Kondensator gespeicherte Ladung	Coulomb, $C = As$
$C = \frac{Q}{U}$	Kapazität des Kondensators	Farad F $1F = 1 \frac{As}{V}$ 1 Mikrofarad ( $\mu F$ ) = $10^{-6}F$ 1 Pikofarad (pF) = $10^{-12}F$
$U = \frac{Q}{C}$	anliegende Spannung	Volt, V
$W_{el} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$	gespeicherte elektrische Energie	Ws, VAs

### 3.1.2 Parallel- und Reihenschaltung von Kondensatoren

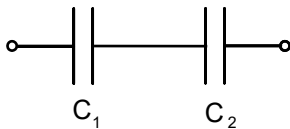
Kondensatoren lassen sich parallel und / oder in Reihe schalten. Dabei gilt:



#### Parallelschaltung

Die resultierende Kapazität von beliebig vielen, parallel geschalteten Kondensatoren ist gleich der Summe aller Kapazitäten:

$$C_{\text{ges}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$



#### Reihenschaltung

Der Kehrwert der resultierenden Kapazität einer Reihenschaltung von beliebig vielen Kondensatoren ist gleich der Summe der Kehrwerte der Kapazitäten der einzelnen

Kondensatoren:

$$\frac{1}{C_{\text{ges}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$$

Bei zwei in Reihe geschalteten Kondensatoren (und nur da!) gilt die einfache Formel

$$C_{\text{ges}} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

### 3.1.3 Aufladen und Entladen eines Kondensators

Lädt man einen ungeladenen Kondensator, so ändert sich seine Spannung  $U_c$ . Diese Änderung kann nicht in unendlich kurzer Zeit geschehen, denn der dazu benötigte Strom müsste nach der Formel:

$$I = C \cdot \frac{dU_c}{dt}$$

unendlich groß sein. Sprunghafte Spannungsänderungen sind bei Kondensatoren also nicht möglich.

Lädt man einen Kondensator  $C$  über einen Widerstand  $R$  auf die Betriebsspannung  $U_B$ , so steigt die Kondensatorspannung nach einer Exponentialfunktion:

$$U_c = U_B \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

Die für den Ladevorgang charakteristische Zeitkonstante  $\tau$  ergibt sich aus dem Produkt aus Widerstand  $R$  und Kapazität  $C$ . Sie hat die Einheit Sekunde.

$$\tau = R \cdot C$$

Für den Strom  $I$  gilt während des Auflade Vorganges nach dem Ohm'schen Gesetz:

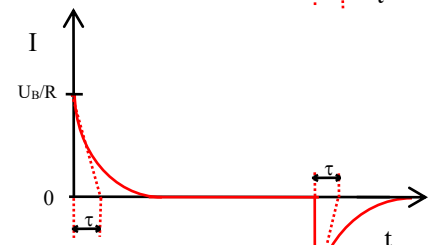
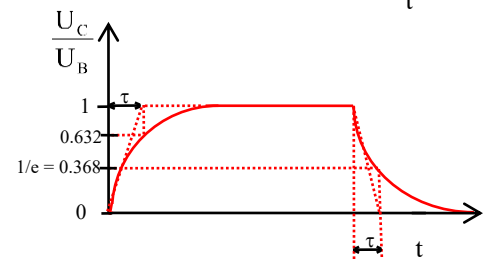
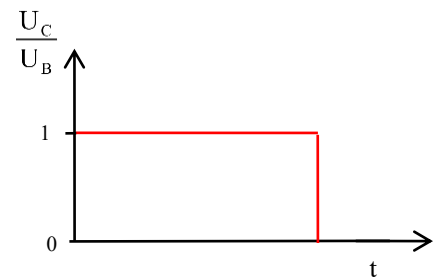
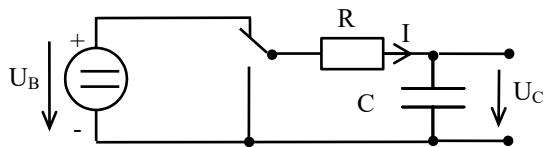
$$I = \frac{U_B}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Nachfolgend sei der Auflade Vorgang und auch der Entladevorgang eines Kondensators über einen Widerstand tabellarisch zusammengefasst mit einigen charakteristischen Zeitpunkten. Dabei wurde zur Vereinfachung gesetzt:

$$I_0 = \frac{U_B}{R}$$

Vorgang	allgemein	t = 0	t = $\tau$	t $\rightarrow \infty$
<b>Aufladen</b>	$U_c = U_B \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$	$U_c = 0$	$U_c = U_B (1 - e^{-1}) = 0,632 \cdot U_B$	$U_c = U_B$
	$I = I_0 \cdot e^{-t/\tau}$	$I = I_0$	$I = I_0 \cdot e^{-1} = 0,368 \cdot I_0$	$I = 0$
<b>Entladen</b>	$U_c = U_B \cdot e^{-t/\tau}$	$U_c = U_B$	$U_c = U_B \cdot e^{-1} = 0,368 \cdot U_B$	$U_c = 0$
	$I = -I_0 \cdot e^{-t/\tau}$	$I = -I_0$	$I = -I_0 \cdot e^{-1} = -0,368 \cdot I_0$	$I = 0$

Spannungs- und Stromverlauf am Kondensator



Zeitlicher Spannungs- und Stromverlauf am Kondensator



### 3.1.4 Wechselstromwiderstand bei sinusförmiger Wechselspannung

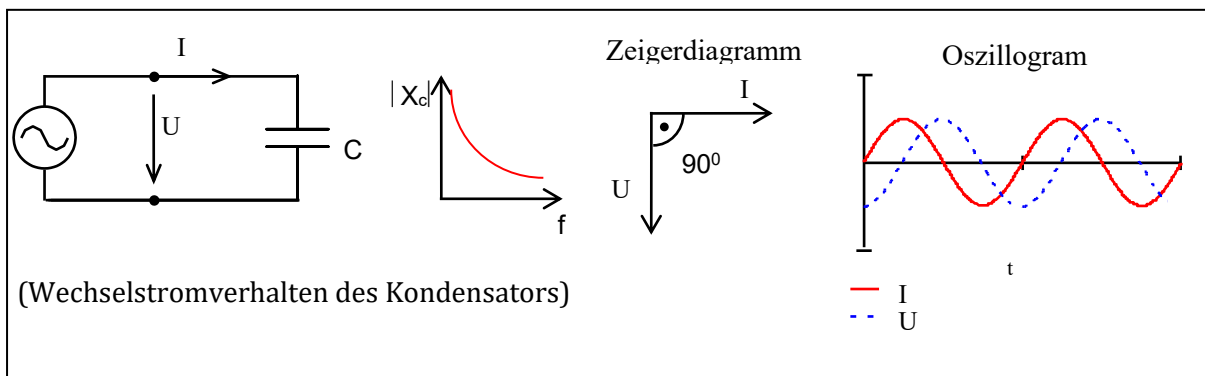
Beim kapazitiven Blindwiderstand eilt der Sinusstrom der Sinusspannung um  $90^\circ$  vor.  
(Eselsbrücke: **K**apazitiver **I**nduktions **U**rsprung)

Der Quotient der Beträge von Spannung und Strom am Kondensator ergibt den Betrag des kapazitiven Widerstandes (Einheit:  $\Omega$ )

$$|X_c| = \frac{|U|}{|I|}$$

Der kapazitive Widerstand ist frequenzabhängig und nimmt mit der Frequenz  $f$  umgekehrt proportional ab

$$|X_c| = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$



### 3.2 Die Spule (Drossel)

Die Spule dient zur Speicherung von magnetischer Energie. Der Zusammenhang zwischen dem Strom  $I$ , der die Spule durchfließt, dem magnetischen Spulenfluß  $\Psi$  und der Induktivität  $L$  wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$\Psi = L \cdot I$$

Der magnetische Spulenfluß (Gesamtfluß)  $\Psi$  ist über die Windungszahl  $n$  mit dem magnetischen Fluß  $\phi$  einer Windung verknüpft über:

$$\Psi = n \cdot \phi$$

Die Induktivität  $L$  einer Spule hängt von ihren geometrischen Eigenschaften und von Materialeigenschaften ab. Für eine lange Zylinderspule gilt:

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

Die in dieser Gleichung enthaltenen Größen sind in folgender Tabelle zusammengefasst und erklärt:

Symbol	Einheit	Erklärung
$L$	Henry, $1\text{H} = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{A}} = 1\Omega\text{s}$	Induktivität der Spule
$\mu_0$	$\frac{\text{Vs}}{\text{Acm}}$	$\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Vs}}{\text{Acm}}$ , abs. Permeabilität
$\mu_r$	1	relative Permeabilitätszahl, dimensionslos
$n$	1	Windungszahl der Spule, dimensionslos
$A$	$\text{cm}^2$	von den magnetischen Feldlinien durchströmte Fläche
$l$	cm	Länge der Spule
$\Psi$	$\text{Vs}, 1\text{Vs} = 1\text{Weber} = 10^8 \text{ Maxwell}$	magnetische Flussverketung
$\phi$	$\text{Vs}, 1\text{Vs} = 1\text{Wb} = 10^8 \text{ Maxwell}$	magnetischer Fluss

Ändert sich der Spulenstrom  $I$ , so wird in der Spule eine Spannung induziert:

---

$$U_L = L \frac{dI}{dt}$$

### 3.2.1 Auf- und Entmagnetisieren einer Spule

Schließt man eine stromlose Spule über einen Widerstand an eine Spannungsquelle mit der Spannung  $U_B$ , so liegt im ersten Moment die volle Spannung  $U_B$  an der Spule. Der Spulenstrom kann seinen Wert nicht sprunghaft ändern, sondern nähert sich stetig seinem Endwert  $I_0$  nach folgender Exponentialfunktion:

$$I = I_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

Dabei gilt

$$I_0 = \frac{U_B}{R}$$

Die für den Ladevorgang charakteristische Zeitkonstante  $\tau$  ergibt sich aus dem Quotient aus Induktivität  $L$  und Widerstand  $R$ . Sie hat die Einheit Sekunde:

$$\tau = \frac{L}{R}$$

Für die Spannung  $U_L$  gilt während des Aufladevorgangs:

$$U_L = U_B \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Nachfolgend sei der Auflade Vorgang und auch der Entladevorgang einer Spule über einen Widerstand tabellarisch zusammengefasst mit einigen charakteristischen Zeitpunkten:

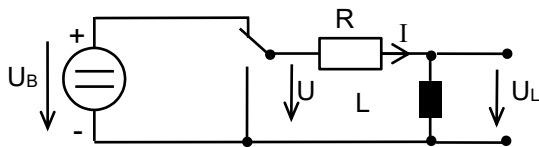
Vorgang	allgemein	t = 0	t = $\tau$	t $\rightarrow \infty$
<b>Aufladen</b>	$I = I_0 \cdot (1 - e^{-t/\tau})$	$I = 0$	$I = I_0 (1 - e^{-1}) = 0,632 \cdot I_0$	$I = I_0$
	$U_L = U_B e^{-t/\tau}$	$U_L = U_B$	$U_L = U_B e^{-1} = 0,368 U_B$	$U_L = 0$
<b>Entladen</b>	$I = I_0 e^{-t/\tau}$	$I = I_0$	$I = I_0 \cdot e^{-1} = 0,368 \cdot I_0$	$I = 0$
	$U_L = -U_B e^{-t/\tau}$	$U_L = -U_B$	$U_L = -U_B e^{-1} = -0,368 U_B$	$U_L = 0$

### Beachte:

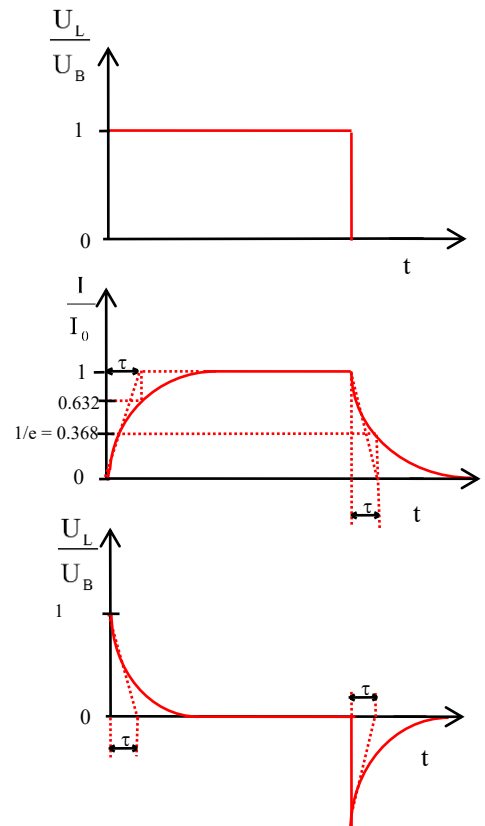
Beim Einschalten springt  $U_L$  auf  $U_B$ . Beim Abschalten wird die Spule kurzgeschlossen, nicht abgetrennt. Dabei springt  $U_L$  auf  $-U_B$ . Die Spule darf nicht einfach abgetrennt werden, denn dann würde der Strom auf 0 springen müssen. Das hätte nach

$$U_L = L \frac{dI}{dt} \text{ theoretisch einen unendlich hohen Spannungssprung}$$

zur Folge. Beim Abschalten von Induktivitäten können Spannungsüberschläge auftreten, die Schaltungen zerstören und Menschen gefährden können!



Auf und Entmagnetisierung



Zeitlicher Spannungs- und Stromverlauf an der Spule

### 3.2.2 Die reale Spule (mit Verlusten)

Im Ersatzschaltbild berücksichtigt man die Verluste durch einen in Reihe geschalteten Widerstand R. In ihm sind neben den (Ohm'schen) Kupferverlusten auch frequenzabhängige Ummagnetisierungs - und Wirbelstromverluste des Kernmaterials enthalten. Für den komplexen Widerstand einer realen Spule gilt somit:

$$\underline{Z} = R + j\omega L = r + j 2 \pi f L$$

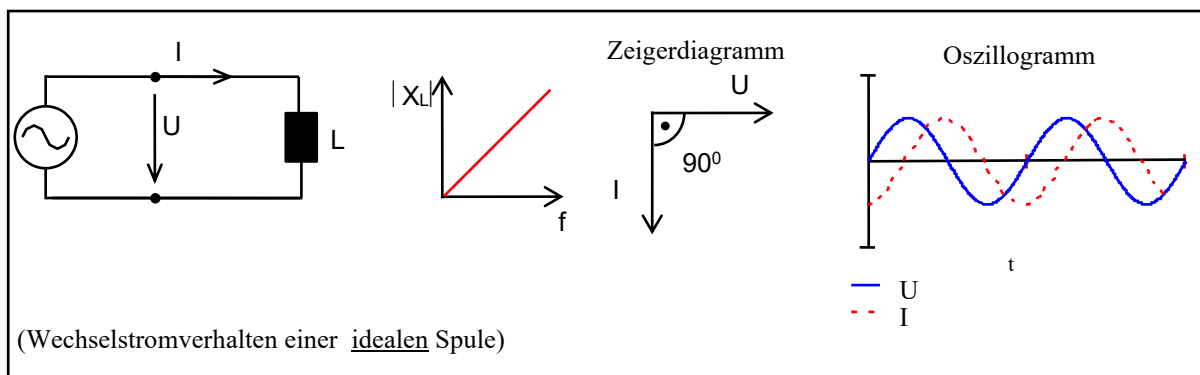
$$|Z| = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

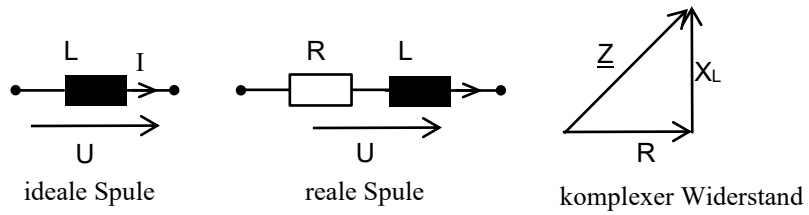
Die Begründung für die Wurzelfunktion wird klar, wenn man bedenkt, dass Strom und Spannung an der Spule nicht dieselbe Phase haben. Die Spannung am induktiven Teil ist bezogen auf den Strom um 90° phasenverschoben und eilt dem Strom voraus (Eselsbrücke: **I**nduktivität: **I** nach **d**em **U**). Der Betrag des Gesamtwiderstandes der Spule kann aus dem Quotienten der Beträge der an den Klemmen der realen Spule messbaren Werte von Spannung und Strom gebildet werden. (Einheit:  $\Omega$ )

$$|Z| = \frac{|U|}{|I|}$$

Der induktive Widerstand ist frequenzabhängig und nimmt mit der Frequenz f linear zu:

$$|X_L| = \omega L = 2 \pi f L$$





(Ideale und reale Spule)