

Grundlagen der Elektrotechnik

Inhaltsverzeichnis	Seite
LERNZIELE DER VORLESUNG: GRUNDLAGEN DER ELEKTROTECHNIK	3
<u>LITERATURLISTE ELEKTROTECHNIK</u>	4
EINLEITUNG	6
1. PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN	6
1.1 Die Elementarladung als Bestandteil des Atoms	6
1.2 Mechanismus des el. Stromes	9
1.3 Ursachen des el. Stromes	11
1.4 Der el. Widerstand	12
2. UNTERSUCHUNGEN IM GLEICHSTROMKREIS	16
2.1 Der Widerstand als Schaltelement	16
2.2 Berechnungsverfahren für Widerstandsnetzwerke mit Energiequellen	18
2.2.1 Kirchhoffsche Gesetze	18
2.2.2 Widerstandsnetzwerke	20
2.2.4 Eigenschaften von el. Quellen	24
2.3 Der Kondensator	28
2.3.1 Kapazität des Kondensators	28
2.3.2 Energie des geladenen Kondensators	29
2.3.3 Schaltungen im Gleichstromkreis	30
2.3.4 Bauformen des Kondensators	33
2.4. Die Spule	35
2.4.1 Induktivität einer Spule	35
2.4.2 Energie der geladenen Spule	36
2.4.3 Schaltungen im Gleichstromkreis	36
2.4.4 Bauformen der Spule	39
3. WECHSELSTROMTECHNIK	42
3.1 Erzeugung von Wechselspannung	42
3.2 Signalkenngrößen	43
3.3 Berechnungsverfahren von Netzwerken mittels komplexer Zahlen	44
3.4 Frequenzabhängige Bauteile	46
3.5 Leistung und Energie	53

3.6	Drehstrom	54
4.	ELEKTRONIK, HALBLEITERTECHNIK	56
4.1	Dioden	57
4.2	Transistoren	61
4.3	Grundsaltungen	66

Lernziele der Vorlesung: Grundlagen der Elektrotechnik

Problemverständnis und Fachsprache
Anwendungsfelder und Realisierungen
Grundprobleme und Lösungsansätze

Mehrwert: Anwendungsfeld zum Lernen von Lösungsstrategien
- Überlagerungssatz
- Umformen
Lernen der Abstraktionsfähigkeit
- Zeitbereich=> Zeiger => Frequenzdarstellung
Selbstverantwortung und Motivation
- Freiraum zum Lernen mit Literatur
- Anforderungen und Hilfestellung

1. Physikalische Grundlagen

Elementare Grundstruktur der Elektrotechnik
Zusammenhang zwischen mikroskopischer und makroskopischer Betrachtung

2. Untersuchungen im Gleichstromkreis

Berechnungsverfahren im Gleichstromkreis
Strategie und Vorgehen bei der Lösung komplexer Aufgaben
Bauformen und Eigenschaften unterschiedlicher elektrotechnischer Bauteile

3. Wechselstromtechnik

Grundprinzipien der Wechselstromtechnik und Analogie zur Gleichstromtechnik

4. Elektronik, Halbleitertechnik

Bauformen und Eigenschaften unterschiedlicher elektronischer Bauteile

Literaturliste Elektrotechnik

Nr.	
/1/	Moeller u.a. Grundlagen der Elektrotechnik B.G. Teubner Stuttgart ISBN 3-519-36400-X
/2/	Fricke/Vaske Elektrische Netzwerke, Grundlagen der Elektrotechnik 1 B.G. Teubner Stuttgart ISBN 3-519-06403-0
/3/	J. Reth u.a. Grundlagen der Elektrotechnik Vieweg, Braunschweig ISBN 3-528-54016-8
/4/	Führer u.a. Grundgebiete der Elektrotechnik, Band 1: Stationäre Vorgänge Hanser, München ISBN 3-446-13677-0
/5/	Führer u.a. Grundgebiete der Elektrotechnik, Band 2: Zeitabhängige Vorgänge Hanser, München ISBN 3-446-15338-1
/6/	Fachkunde Elektrotechnik Europa Lehrmittel, Wuppertal ISBN 3-8085-3013-8
/7/	Bauckholt Grundlagen und Bauelemente der Elektrotechnik Hanser, München ISBN 3-446-15246-6
/8/	Eigler, Beyer Einführung in die <u>Technologie</u> der Elektronik-Elektrotechnik Hüting, Heidelberg ISBN 3-7785-1123-S
/9/	Glaab, Hagenauer Übungen in Grundlagen der Elektrotechnik Bibliographisches Institut, Mannheim ISBN 3-411-0078
/10/	K. Lunze Theorie der Wechselstromtechnik Verlag Technik, Berlin ISBN 3-341-00984-1
/11/	R. Fischer Elektrische Maschinen Hanser, München ISBN 3-446-18423-6

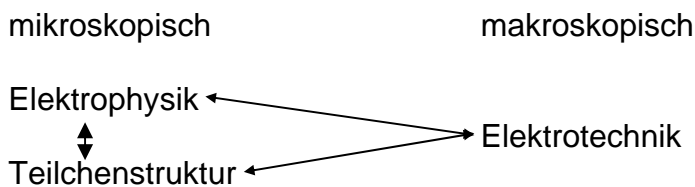
/12/	Lindner u.a. Taschenbuch der Elektrotechnik und Elektronik Fachbuchverlag, Leipzig ISBN 3-343-00847-8
/13/	K. Ruschmeyer u.a. Motoren und Generatoren mit Dauermagneten Expert-Verlag, Grafenau ISBN 3-88508-914-9
/14/	W. Böhm Elektrische Antriebe Vogel-Buchverlag, Würzburg ISBN 3-8023-0132-3
/15/	G. Müller Grundlagen elektrischer Maschinen VHC, Weinheim ISBN 3-527-28390-0
/16/	E. Hering Elektronik für Ingenieure VDI Verlag, Düsseldorf ISBN 3-18-400909-2
/17/	K. Beut Bauelemente Vogel-Buchverlag, Würzburg ISBN 3-8023-0529-9
/18/	K. Beut Grundsaltungen Vogel-Buchverlag, Würzburg ISBN 3-8023-1439-5
/18/	R. Thiel Elektrisches Messen nichtelektrischer Größen Teubner, Stuttgart ISBN 3-519-10067-3
/19/	K. Bergmann Elektrische Meßtechnik Vieweg, Braunschweig ISBN 3-528-44080-5
/20/	D. Nährmann Sensorpraxis Franzis, München ISBN 3-7723-6362-8
/21/	H. Schaumburg Sensoren Teubner, Stuttgart ISBN 3-519-06125-2

Einleitung

Bereiche der Elektrotechnik

- Meßtechnik
- Elektronik
- Nachrichtentechnik
- Energietechnik
- Elektrische Maschinen
- Elektrische Anlagen

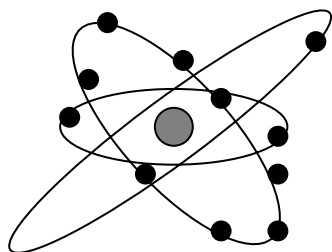
1. Physikalische Grundlagen



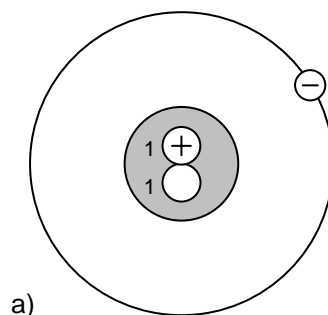
1.1 Die Elementarladung als Bestandteil des Atoms

- Atomaufbau und Entstehung von Leitfähigkeit /2/ 1; /3/ 1; /7/ 31

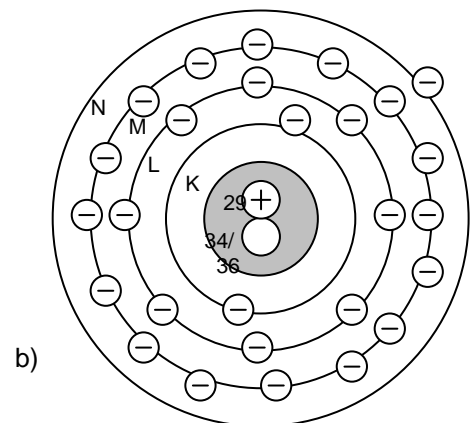
Ausgehend von dem Borschen Atommodell
(Achtung: Ist nur Beschreibungsmodell und nicht Realität)



Atommodell



a)



b)

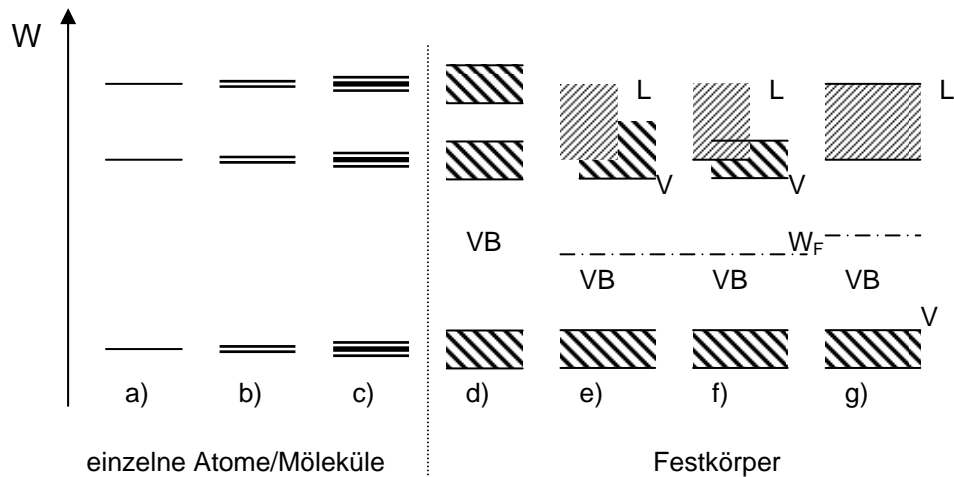
Aufbau neutraler Atome a) Wasserstoff, b) Kupfer

	Ladung	Masse
Elektron	$Q = -e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$	$0,911 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$
Proton	$Q = e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$	$1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Neutron	$Q = 0$	$1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Erscheinungsformen beweglicher Ladung (Ladung ist immer mit Materie verbunden):

- bewegliche Teile die eine el. Ladung besitzen
z.B. Ionen, geladene Teile
- Elektronen

- Bändermodell /1/ 223;/2/ 4; /4/ 219; /7/ 32



W = Energieniveau der Elektronen beim

a) Atom, b) zweiatomigen und c) dreiatomigen Molekül
und beim

d) Festkörper allgemein, e) einwertigen, f) zweiwertigen Metall und g) Nichtmetall

L = Leitungsband, V = Valenzband, VB = verbotenes Band, W_F = Fermi-Energie

- Das Leitungsband zeigt ein höheres Energieniveau
- Zwischenbereiche der Bänder durch Quantifizierung der Energie
- Energie der Elektronen wird in eV gemessen
 $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Js}$

Im Kristallgitter von Metallen werden die Elektronen des Valenzbandes „frei“
beweglich => Leitungsband

- Elektronenanzahl (in Leiter, Halbleiter, Isolator) /4/ 16; /7/ 32

- a) Leiter
- in der äußersten Elektronenschale meist 1 - 3 Elektronen
 - bei Zimmertemperatur können sich Elektronen lösen
=> Leitungsband

Element	Symbol	gesamt	Anzahl der Elektronen Schale						
			K	L	M	N	O	P	
Wasserstoff	H	1	1						
Helium	He	2	2						
Lithium	Li	3	2	1					
Sauerstoff	O	8	2	6					
Fluor	F	9	2	7					
Neon	Ne	10	2	8					
Aluminium	Al	13	2	8	3				
Kupfer	Cu	29	2	8	18	1			
Silber	Ag	47	2	8	18	18	1		
Gold	Au	79	2	8	18	32	18	1	

z.B. Kupfer $8,47 \cdot 10^{22}$ Elektronen / cm^3
 Silber $5,87 \cdot 10^{22}$ Elektronen / cm^3

b) Halbleiter

Nur wenige frei bewegliche Ladungsträger ($10^{10} - 10^{14}$ Elektronen / cm^3)

=> Nichtleiter

+ geringe Energiezufuhr => Leiter (Alternative: Verunreinigung durch Fremdatome)

Halbleitermaterialien:

Kohlenstoff	C	Widerstände
Selen	Se	Gleichrichter
Germanium	Ge	Dioden, Transistoren
Silizium	Si	Dioden, Transistoren
Galliumarsenit	GaAs	LED
Indiumantimonid	InSb	Hallgeneratoren
Zinkoxid	ZnO	Varistoren

c) Isolatoren (Nichtleiter)

- idealer Isolator ist nur Vakuum!!
- Problem: Gute Isolatoren neigen zur statischen Aufladung => Elektronik
- gemeinsame Eigenschaft: Bei der Bildung von Molekülen bzw. Kristallen „keine“ frei beweglichen Ladungsträger

- Gase
 - Edelgase sind sehr gute Isolatoren
Helium hat 2, sonst 8 Elektronen in der äußersten Schale
 - bei anderen Gasen verbinden sich die Atome zu Molekülen
=> fehlen freier Elektronen => Isolator
- flüssige Stoffe
 - reines Wasser
 - spezielle Öle
=> isolieren und kühlen
- feste Stoffe
 - Glas, Porzellan, Quarz, Glimmer, Bernstein, Seide, Papier, Hartgummi, u. Kunststoffe

1.2 Mechanismus des el. Stromes

/1/ 1; /3/ 9; /7/ 41

- Strom als fließende Ladungsmenge /2/ 5; /3/ 14, 84

el. Strom = bewegte Ladung (bei jeder Bewegung von geladenen Teilen fließt Strom)

Formelzeichen: I $I = \text{Ladung/Zeit} = dQ/dt$ [A]

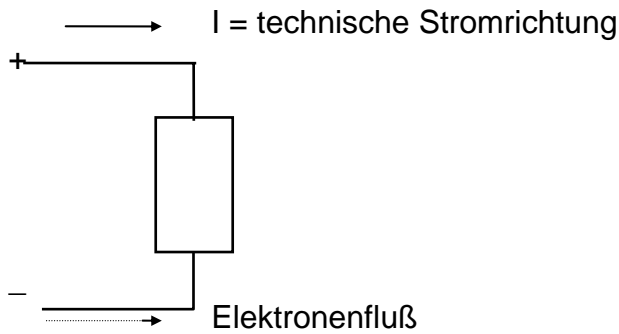
1 A = $6,24 \cdot 10^{18}$ Elektronen/s

- Elektronenstrom:
 - in Leiter = Bewegung der Elektronen
 - in Festkörperphysik auch Löcherstrom (Stellen mit Elektronenmangel wandern)
 - auch im Vakuum möglich (aufheizen einer Kathode erzeugt Elektronenwolke)
- Ionenstrom
 - Atome und Moleküle wandern aufgrund äußerer Kräfte oder chemischer Abläufe
z.B. Elektrolyse, Akkumulator

Wirkungen bewegter el. Ladung:

- Magnetfeld (um einen Leiter) => Elektromagnete, Generatoren
abhängig von der Stromrichtung
- Kraft auf bewegte Ladung im Magnetfeld => Motoren
abhängig von der Stromrichtung
- Wärmeerzeugung => Heizung
unabhängig von der Stromrichtung
- Stofftransport => chem. Analysetechnik
abhängig von der Stromrichtung

- technische Stromrichtung /3/ 5



- Bewegungsgeschwindigkeit der Elektronen

Die Bewegungsgeschwindigkeit der Elektronen beträgt bei:

Leitungsquerschnitt 1,5 mm²
 Leitermaterial Kupfer
 Stromstärke 10 A

$v_e = 0,475 \text{ mm/s}$

Die Wirkungen des el. Stromes treten mit Lichtgeschwindigkeit auf.
 $c \cong 3 \cdot 10^{11} \text{ mm/s}$

- Gefährdung durch el. Strom /6/ 33

Bereich	Stromstärke in mA	Wirkungen auf den Körper	Folgen
1	1 - 2 -10 -25	„Kribbeln“ Muskelkrampf Ansteigen des Blutdrucks	Erschrecken Lähmungserscheinungen Bewußtlosigkeit
2	25 - 50	starke Muskelverkrampfung Magenverkrampfung Herzkammerflimmern	starke Lähmungsersch. Übelkeit Gehirn ohne Sauerstoff
3	>50	Herzkammerflimmern	Herzstillstand, Tod
4	>3000	starke Verbrennungen Herzstillstand	Tod durch Verbrennungen

Besonders gefährlich sind Wechselströme, wenn sie länger als 0,1 Sekunden auf den Körper einwirken und wenn sie über das Herz führen.

1.3 Ursachen des el. Stromes

2/ 13

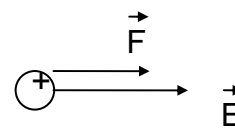
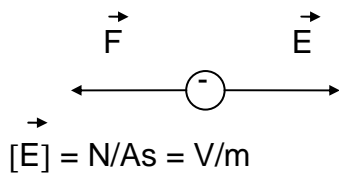
Damit Strom fließen kann muß eine Kraft wirken => Coulombsche Kraft

- Spannung als Kraft /1/ 1; /3/ 17; /4/ 29

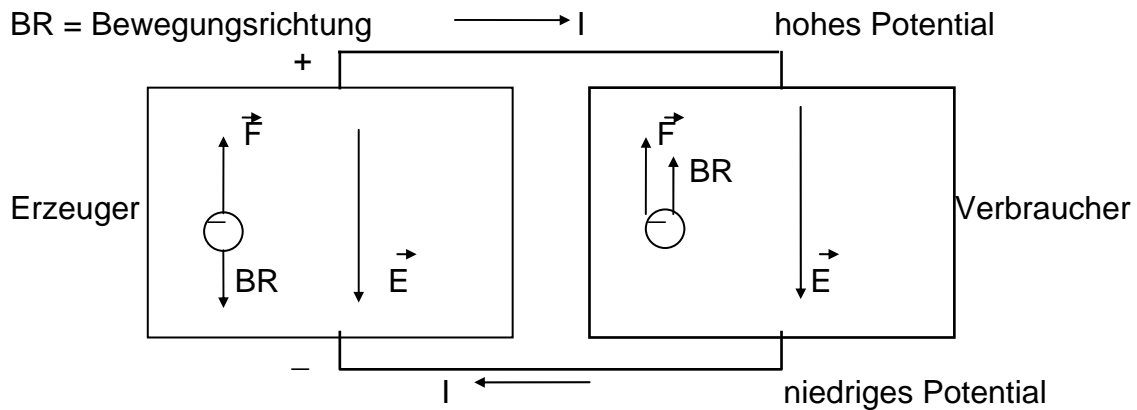
Die Kraft auf eine Ladung ist proportional der Ladungsmenge und abhängig vom Vorzeichen der Ladung.

Damit kann die Feldstärke als ladungsunabhängiger Ortsvektor gebildet werden:

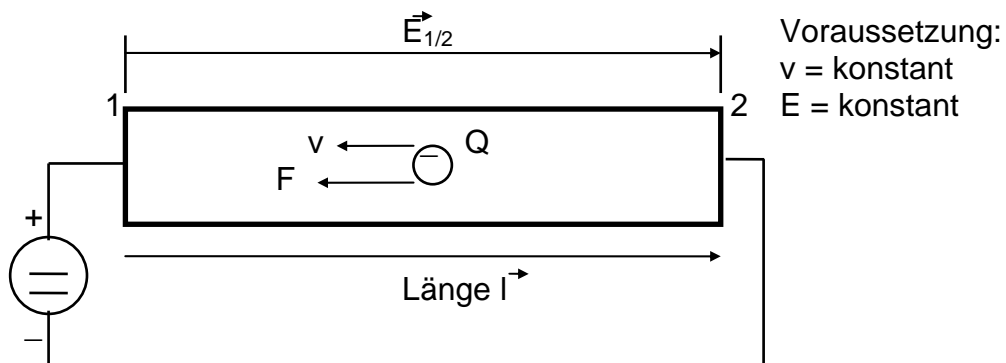
$$\vec{E} = \vec{F}/Q = \text{el. Feldstärke}$$



im Stromkreis:



BR ist dabei die Bewegungsrichtung. Im Erzeuger wird sie durch eine äußere Kraft erzwungen. Im Verbraucher bewegen sich die Elektronen entsprechend des el. Feldes.



Die Arbeit, die von einer von 1 nach 2 bewegten Ladung verrichtet wird, ist:

$$W_{1/2} = \vec{F} * \vec{l}_{1/2} = Q * \vec{E} \cdot \vec{l}_{1/2}$$

Die hier betrachtete Ladung ist negativ. Damit verrichtet die Ladung, z.B. ein Elektron, positive Arbeit. Beziehen wir die Arbeit auf die transportierte Ladung erhalten wir:

$$U_{1/2} = W_{1/2}/Q = \vec{E} * \vec{l}_{1/2} \quad [U] = V = \text{Nm/As}$$

die Spannung U im Volt. Allgemein berechnet sich die Spannung zwischen 2 Punkten aus der Integration eines el. Feldes über eine Wegstrecke. Wählen wir dabei einen geschlossenen Weg, muß die sich ergebende Spannung null sein (=> Maschensatz).

- Kraft auf die Elementarladung

Die Beschleunigung, die ein Elektron erfährt, beträgt ca. 10^9 m/s^2 , die eines Autos ca. 3 m/s^2 .

1.4 Der el. Widerstand

/7/ 34

- Ohmsches Gesetz /1/ 20; /2/ 18; /3/ 23; /6/ 26; /7/ 44

Die Spannung U ist die treibende Kraft für die Ladungsbewegung und der Strom I ist ein Maß für die entstehende Bewegung. Damit kann der Widerstand, den ein Material der Ladungsbewegung entgegensetzt, beschrieben werden als:

$R = \frac{U}{I}$	$[R] = \frac{V}{A} = \Omega \text{ oder } U = R * I \text{ oder } I = \frac{U}{R}$
-------------------	--

- Energie und Leistung /1/ 83; /2/ 15, 60, 70; /3/ 17,75; /4/ 26; /6/ 51; /7/ 114

Die Arbeit, die durch eine Ladung verrichtet wird, kann durch:

$$W = U * Q \text{ beschrieben werden.}$$

Da der Strom Ladungsfluß/Zeiteinheit beschreibt, gilt:

$$Q = I * t$$

und damit:

$$W = U \cdot I \cdot t \quad [W] = Ws = VAs = J = Nm = \text{kgm}^2/\text{s}^2$$

Allgemein ist die vom Strom verrichtete Arbeit das Zeitintegral über die Augenblickswerte von U und I.

Die Leistung als Arbeit pro Zeiteinheit ergibt sich dann als:

$$P = W / t = U \cdot I$$

Sind U und I nicht konstant, so wird die Leistung aus den Augenblickswerten gebildet.

- Temperaturabhängigkeit /1/ 18; /3/ 32; /7/ 38

Wird ein Material erwärmt, so ändern sich seine Materialeigenschaften. Dies führt auch zu einer Änderung des el. Widerstandes. Dabei gibt es 2 gegenläufige Einflüsse:

- eine höhere Eigenbewegung der Atomrümpfe im Kristallgitter behindert zunehmend den Elektronenfluß
- durch zunehmende Eigenbewegung stehen mehr Elektronen im Leitungsband zur Verfügung

Die Abhängigkeit eines Widerstandes von der Temperatur wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$R_{\vartheta} = R_{20} (1 + \alpha (\vartheta - 20^\circ) + \beta (\vartheta - 20^\circ)^2) = R_{20} + \Delta R$$

R_{20} ist dabei der Widerstand bei Raumtemperatur
 α und β sind materialspezifische Temperaturbeiwerte
 β spielt dabei erst ab einer Temperatur $> 100^\circ\text{C}$ eine Rolle.

Temperaturzahlen metallischer Leiter:

Werkstoff	α_{293} 10^{-3} K^{-1}	β_{293} 10^{-6} K^{-2}	Werkstoff	α_{293} 10^{-3} K^{-1}	β_{293} 10^{-6} K^{-2}
Silber	3,8	0,7	Aldrey	3,6	-
Kupfer	3,93	0,6	Messing	1,5	-
Gold	4,0	0,5	Neusilber	0,25	-
Aluminium	3,77	1,3	Goldchrom	0,001	0,1
Magnesium	3,9	1	Nickelin	0,23	-
Wolfram	4,1	1	Manganin	$\pm 0,01$	0,4
Zink	3,7	2	Novokonstantan	-0,01...0,04	-
Nickel	3,7...6	9	Rheotan	0,23	-
Eisen	4,5 6	6	Isabellin	0,02...0,04	-
Zinn	4,2	6	Konstantan	-0,03	-
Platin	2...3	0,6	Resistin	$\pm 0,02$	-
Blei	4,2	2	Kruppin	0,7	-
Quecksilber	0,92	1,2	Chromnickel	0,1	-
Wismut	4,2	-	Megapyr	0,025	-
Kohle	-0,5	-	Kantal	0,06	-

Z.B. 100W Glühlampe

- Temperatur des Glühdrahtes: 2700 - 2800 °C
- Länge des Glühdrahtes: 1 m
- Querschnitt des Glühdrahtes ca. $4 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2$
- $R_9 = 484 \Omega$
- $R_{20} = 14,29 \Omega$
- Material: Wolfram

- spezifischer Widerstand /1/ 14; /2/ 24; /3/ 29

Aus den Zusammenhängen, die zur el. Leitfähigkeit führen wird deutlich, daß der Widerstand eines Materials von seiner Geometrie linear abhängig sein muß.

- je Größer der Querschnitt, um so kleiner der R
- je länger die Leitung, um so größer der R

Das bedeutet aber auch, daß für jedes Material ein spezifischer Widerstand ρ definiert werden kann. Damit kann dann der Widerstand von Leitern in Abhängigkeit der Geometrie, oder die Geometrie aus dem gewünschten Widerstandswert berechnet werden.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad \text{oder} \quad l = \frac{R \cdot A}{\rho} \quad \text{oder} \quad A = \rho \cdot \frac{l}{R}$$

Einheitswiderstände metallischer Leiter bei 293 K

Werkstoff	ρ_{293} $10^{-6} \Omega\text{m}$	Werkstoff	ρ_{293} $10^{-6} \Omega\text{m}$
Silber	0,016	Bronze	0,018...0,056
Kupfer	0,01786	Aldrey	0,033
Gold	0,023	Messing	0,07..0,09
Aluminium	0,02857	Neusilber	0,3
Magnesium	0,045	Goldchrom	0,33
Wolfram	0,055	Nickelin	0,43
Zink	0,063	Manganin	0,43
Nickel	0,08...0,11	Novokonstant	0,45
Eisen	0,1...0,15	Rheotan	0,47
Zinn	0,11	Isabellin	0,5
Platin	0,11...0,14	Konstantan	0,5
Blei	0,21	Resistin	0,4
Quecksilber	0,96	Kruppin	0,85
Wismut	1,2	Chromnickel	1,1
Kohle	100,0	Megapyr	1,4
		Kantal	1,45

Wird die Länge in m und der Querschnitt in mm² in die Gleichungen eingesetzt, so kann der Zahlenwert ohne die Zehnerpotenz direkt eingesetzt werden.

Einheitswiderstände fester Isolierstoffe

Werkstoff	$\rho_{293} \Omega\text{cm}$	Werkstoff	$\rho_{293} \Omega\text{cm}$
Bernstein	10^{16}	Parafin	10^{14}
Glas	10^{12}	Polyäthylen	10^{16}
Glimmer	$10^{12} \dots 10^{15}$	Polyvinylchlorid	10^{14}
Gummi	10^{13}	Polystirol	10^{16}
Hartgummi	$10^{10} \dots 10^{16}$	Preßspan	10^8
Keramiken	10^{10}	Porzellan	$3 \cdot 10^{12}$
Kunstharz	$10^6 \dots 10^{12}$	Schellack	10^{14}
Marmor	$10^7 \dots 10^9$	Steatit	10^{12}
Mikanit	10^{13}	Vinidur	10^{13}

Die Werte zeigen, daß zwischen den guten Leitern und guten Isolatoren mehr als 20 Zehnerpotenzen Unterschied liegt.

2. Untersuchungen im Gleichstromkreis

2.1 Der Widerstand als Schaltelement

- Widerstandsbauteile /4/ 44; /7/ 258

Widerstände ermöglichen das Aufteilen von Strömen und Spannungen in kleinere Werte. In elektronischen Schaltungen setzen Widerstände Stromänderungen in verhältnismäßige Spannungsänderungen um. Ein ohmscher Widerstand verhält sich bei allen Stromarten gleich.

Der ohmsche Widerstand setzt elektrische Leistung in Wärme um.

Daher ist beim Einbau auf die Belastbarkeit zu achten.

Festwiderstände:

- *Kohleschichtwiderstände:*
gute Hochfrequenzeigenschaften
(10 OHM bis 1 MOHM , 250 V/max. 4W)
Preis: Stück 0,15.- DM
- *Metallschichtwiderstände:*
gute Hochfrequenzeigenschaften
(5,1 OHM bis 510 KOHM)
Preis: Stück 0,20 DM
- *Drahtwiderstände:*
bei Wechselstrom auf Frequenz achten,
da Eigenschaften wie Spule
(max . 27 KOHM)
Preis: Stück 0,25 DM bis 5,00 DM
- *Massewiderstände:*
(Billigwiderstand, nur an unkritischen Stellen einbauen,
wegen z.B. Stromrauschen an Verstärkerschaltungen).
Preis: Stück 0,07 DM

Einstellbare Widerstände:

- Drehwiderstände = Potentiometer (Potti)
Die Einstellung kann, je nach Ausführung, mit einer Drehachse, einem Schieber oder mit Hilfe eines Schraubenziehers vorgenommen werden
Die einfachsten einstellbaren Widerstände sind ungeschützte Drahtwiderstände mit einer verschiebbaren Schelle
Anwendungen: Spannungsteiler und Stellwiderstände z.B.an Verstärkern
Preis: Stück 0,40 DM bis 200 DM

Temperaturabhängige Widerstände:

- Kaltleiter (PTC-Widerstände)

Funktion:

geringe Temperatur - geringer Widerstand

hohe Temperatur - hoher Widerstand

Anwendung: z.B. Temperaturfühler gegen Motorüberhitzung

Preis: Stück 1,00 DM bis 10 DM

- Heißleiter (NTC-Widerstände)

Funktion:

geringe Temperatur, hoher Widerstand

hohe Temperatur, geringer Widerstand

Anwendungen: Temperaturstabilisierung in Halbleiterschaltungen

Stromkreisen zur Herabsetzung des Einschaltstromes

Temperaturfühler

Preis: Stück 1,00 DM bis 10 DM

Spannungsabhängige Widerstände:(VDR = Voltage Dependent Resistor)

Hier nimmt der Widerstand bei wachsender Spannung stark ab

Anwendungen: Spannungsbegrenzung, Spannungsstabilisierung,
Funkenlöschung

Preis: Stück 1,00 DM bis 5 DM

Fotowiderstand (Helleiter) LDR = light dependent resistor

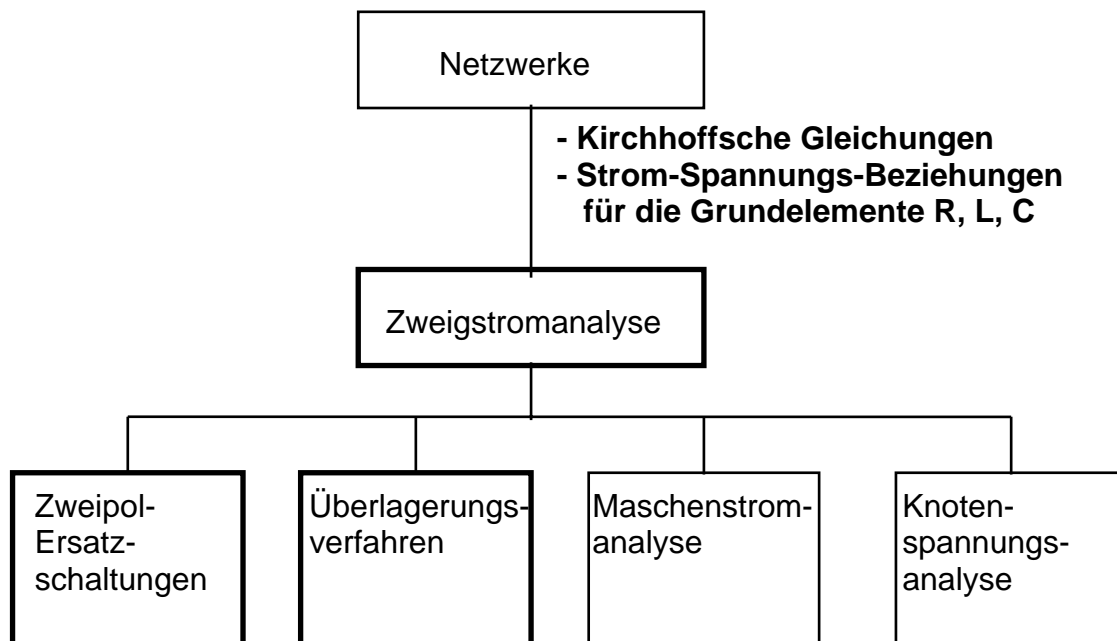
Hier nimmt der Widerstand bei Lichteinfall ab

Anwendungen: Belichtungsmesser, Dämmerungsschaltungen,
Flammenwächter

Preis: Stück 0,90 DM bis 10 DM

2.2 Berechnungsverfahren für Widerstandsnetzwerke mit Energiequellen

/2/ 110; /10/ 11



2.2.1 Kirchhoffsche Gesetze

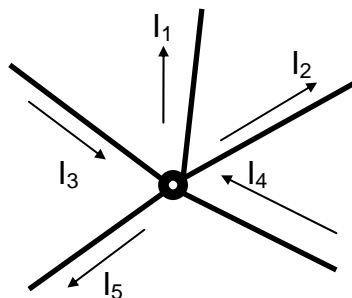
/2/ 127

- Knotensatz /1/ 25; /2/ 50; /3/ 46, 66; /4/ 61; /7/ 70

Der Knotensatz sagt aus, daß die Summe aller Ströme in einen Punkt 0 sein muß. Geht man davon aus, daß Ladung materiebehaftet ist, ist dies eine Selbstverständlichkeit. Dies gilt auch für einen „komplexen“ Knoten, z.B. einem Gerät oder einer Anlage und auch wenn Energiespeicher enthalten sind.

$$\sum I_n = 0$$

Dabei ist die Pfeilung der Ströme zu beachten!!!

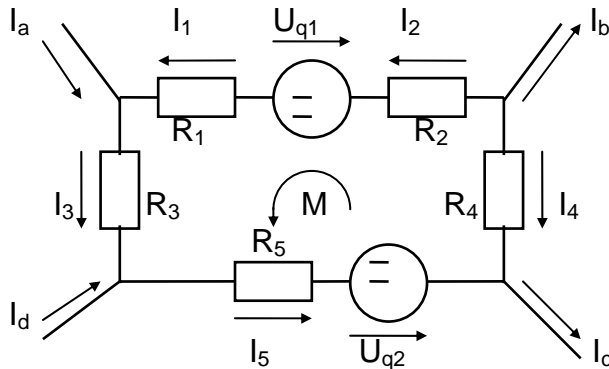


$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 + I_5 = 0$$

- Maschensatz /1/ 26; /2/ 52; /3/ 63; /4/ 62

Der Maschensatz sagt aus, daß die Summe aller Spannungen in einer Masche (geschlossener Weg in einer Schaltung) 0 sein muß (wie wir schon bei der Herleitung der Spannung gesehen haben).

Das Beispiel geht davon aus, daß die Ströme, die die Schaltung mit der Umgebung verbinden, bekannt sind, ebenso die Widerstandswerte und die Spannungsquellen.



Die Pfeilung in der Masche, also die Maschenströme, können wir beliebig festlegen.

Zur Berechnung der Schaltung können wir nun die Maschengleichung aufstellen, das bedeutet, die Spannungen in der Masche in einem festgelegten Umlaufsinn addieren. Für die einzelne Bauteile gilt ja $U = R \cdot I$.

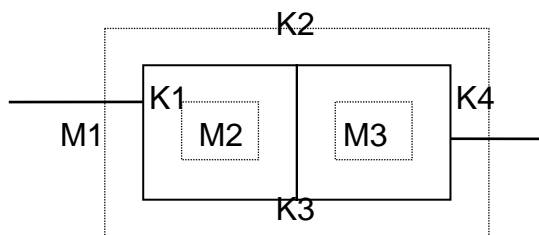
$$(R_1 \cdot I_1) - U_{q1} + (R_2 \cdot I_2) - (R_4 \cdot I_4) + U_{q2} + (R_5 \cdot I_5) + (R_3 \cdot I_3) = 0$$

- Gleichungssysteme /1/ 72; /2/ 155

Bei dem obigen Beispiel sind die Ströme $I_1 \dots I_5$ unbekannt und es gilt $I_1 = I_2$. Somit sind in der Gleichung 4 Unbekannte. Zur Lösbarkeit werden noch 3 Knotengleichungen benötigt (nicht 4).

$$I_a + I_1 - I_3 = 0; I_2 + I_4 + I_b = 0; I_4 - I_c + I_5 = 0; (I_3 + I_d - I_5 = 0)$$

Damit haben wir 4 Gleichungen für 4 Unbekannte. Dieses Prinzip läßt sich auch bei Schaltungen mit mehr als einer Masche anwenden. Es ist dabei darauf zu achten, daß keine redundanten Gleichungen benützt werden.



K1 bis K4 und M1 bis M3 stellen jeweils ein redundantes Gleichungssystem dar. Für die Berechnung der Schaltung müssen hier 2 Maschen und 3 Knoten benützt werden.

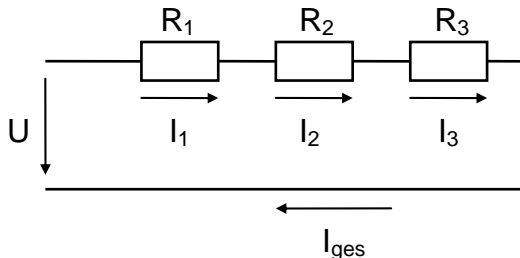
Eine systematische Erweiterung dieses Verfahrens baut dann auf Matrizen- und Vektorrechnung auf.

2.2.2 Widerstandsnetzwerke

- Parallel- und Reihenschaltung /1/ 39; /2/ 95; /3/ 40; /6/ 40; /7/ 59

a) Reihenschaltung

Eine Reihenschaltung von 2 Bauteilen liegt dann vor, wenn zwischen den Bauteilen keine Verzweigung vorhanden ist.



Nach dem Knotensatz muß gelten: $I_1 = I_2 = I_3 = I_{ges}$

Der Maschensatz ergibt: $U = R_1 \cdot I_1 + R_2 \cdot I_2 + R_3 \cdot I_3 = I_{ges} (R_1 + R_2 + R_3)$

Also ist die Gesamtspannung gleich der Summe der Einzelspannungen.

Der Gesamtwiderstand berechnet sich aus:

$$R_{ges} = \frac{U}{I_{ges}} = R_1 + R_2 + R_3$$

Bei einer Reihenschaltung ist der Gesamtwiderstand gleich der Summe der Teilwiderstände.

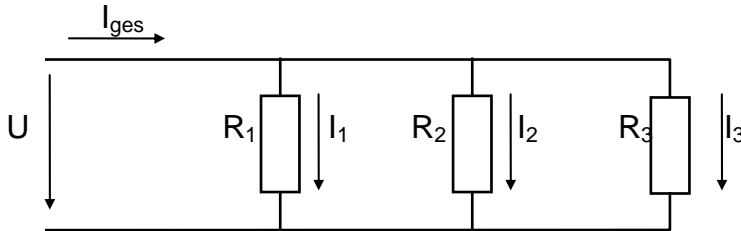
Für n gleiche Widerstände gilt: $R_{ges} = R \cdot n$

Ist ein Teilwiderstand sehr viel größer als die anderen, so ist der Gesamtwiderstand näherungsweise gleich dem großen Teilwiderstand.

Ist ein Teilwiderstand sehr viel kleiner als die anderen, so ist der Gesamtwiderstand näherungsweise unabhängig von dem kleinen Teilwiderstand.

b) Parallelschaltung

Eine Parallelschaltung von Bauteilen liegt dann vor, wenn die Anschlüsse jeweils direkt verbunden sind.



Nach dem Knotensatz muß gelten: $I_1 + I_2 + I_3 = I_{ges}$

Also ist der Gesamtstrom gleich der Summe der Teilströme.

Der Maschensatz ergibt: $U = R_1 \cdot I_1 = R_2 \cdot I_2 = R_3 \cdot I_3$

Der Gesamtwiderstand, wegen der vereinfachten Schreibweise hier als Kehrwert, berechnet sich aus

$$\frac{1}{R_{ges}} = \frac{I_{ges}}{U} = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{U} = \frac{I_1}{U} + \frac{I_2}{U} + \frac{I_3}{U} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Bei der Parallelschaltung ist der Kehrwert des Gesamtwiderstandes gleich der Summe der Kehrwerte der Einzelwiderstände.

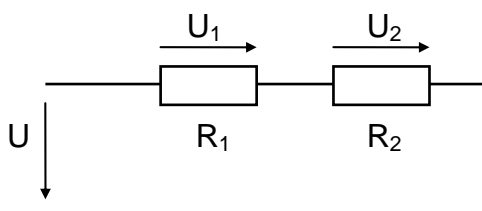
Für n gleiche Widerstände gilt: $R_{ges} = \frac{R}{n}$

Ist ein Teilwiderstand sehr viel größer als die anderen, so ist der Gesamtwiderstand näherungsweise unabhängig von dem großen Teilwiderstand.

Ist ein Teilwiderstand sehr viel kleiner als die anderen, so ist der Gesamtwiderstand näherungsweise gleich dem kleinen Teilwiderstand.

c) Spannungsteilerregel

In einer Reihenschaltung teilt sich die Spannung entsprechend den Widerständen auf.



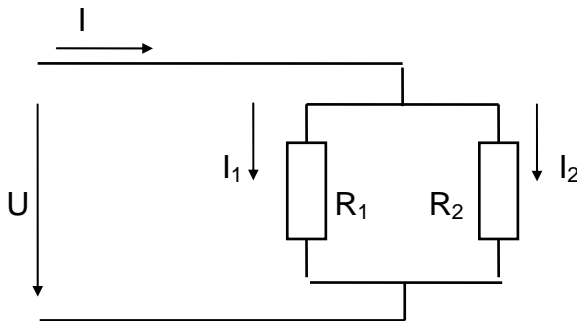
Es gilt also:

$$\frac{U}{U_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad \text{und} \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

Dabei kann R_1 oder R_2 eine zusammengefaßte Schaltung repräsentieren.

d) Stromteilerregel

Bei einer Parallelschaltung teilen sich in dem Knoten die Ströme entgegengesetzt den Zweigwiderständen auf.



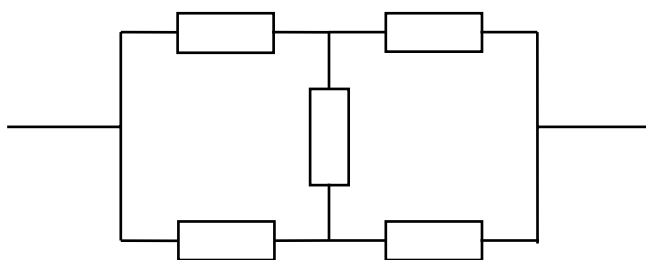
Es gilt also:

$$\frac{I}{I_1} = \frac{R_1}{\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad \text{und} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

Dabei kann R_1 oder R_2 eine zusammengefaßte Schaltung repräsentieren.

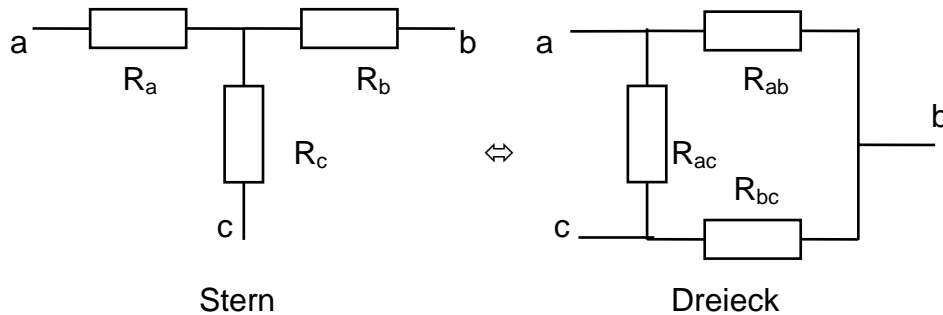
- Stern/Dreieck-Umwandlung /1/ 57; /2/ 143; /3/ 348; /7/ 98

Im nachfolgenden Netzwerk sind keine Parallel- oder Reihenschaltungen (Brückenschaltung). Es kann durch Zusammenfassen nicht weiter vereinfacht werden .



Die Stern-Dreieck-Umwandlung dient dazu, die Topologie eines Netzwerkes zu verändern.

Die Idee dabei ist, nach Gleichungen zu suchen, die es ermöglichen eine Sternstruktur in eine Dreieckstruktur umzuwandeln und umgekehrt.



Wenn sich beide Schaltungen bezüglich ihren Klemmenpaaren ab, bc, ca jeweils gleich verhalten, so kann jeweils die eine durch die andere ersetzt werden. Für diese Klemmenpaare gilt:

Klemmen	Stern	=	Dreieck
ab	$R_a + R_b$	=	$\frac{R_{ab}(R_{ac} + R_{bc})}{R_{ab} + R_{ac} + R_{bc}}$
bc	$R_c + R_b$	=	$\frac{R_{bc}(R_{ab} + R_{ac})}{R_{ab} + R_{ac} + R_{bc}}$
ac	$R_a + R_c$	=	$\frac{R_{ac}(R_{ab} + R_{bc})}{R_{ab} + R_{ac} + R_{bc}}$

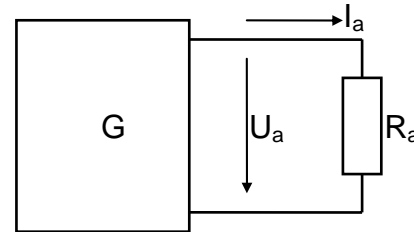
Dies sind 3 Gleichungen mit jeweils, je nach Umformung, 3 Unbekannten. Löst man die Gleichungen auf ergeben sich folgende Gleichungen:

Von Dreieck nach Stern	Von Stern nach Dreieck
$R_a = \frac{R_{ab} \cdot R_{ac}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ac}}$	$R_{ab} = R_a + R_b + \frac{R_a \cdot R_b}{R_c}$
$R_b = \frac{R_{ab} \cdot R_{bc}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ac}}$	$R_{bc} = R_c + R_b + \frac{R_c \cdot R_b}{R_a}$
$R_c = \frac{R_{ac} \cdot R_{bc}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ac}}$	$R_{ac} = R_a + R_c + \frac{R_a \cdot R_c}{R_b}$
Bei gleichen Widerständen: $R_{ab} = R_{bc} = R_{ac} = R_{Dreieck}$ $\Rightarrow R_{Stern} = R_{Dreieck} / 3$	Bei gleichen Widerständen: $R_a = R_b = R_c = R_{Stern}$ $\Rightarrow R_{Dreieck} = R_{Stern} \cdot 3$

2.2.4 Eigenschaften von el. Quellen

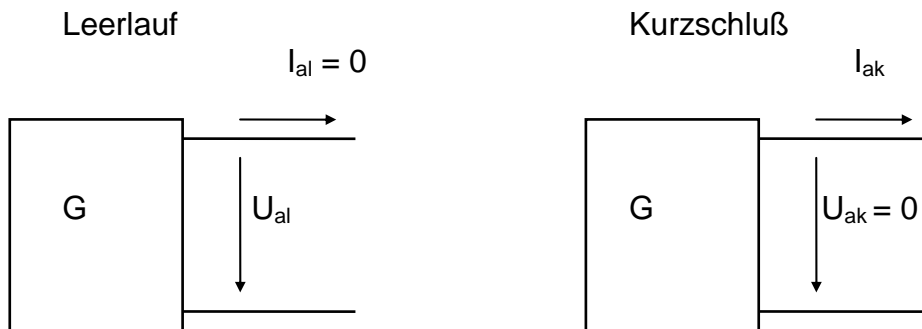
- ideale und reale elektrische Quelle /1/ 28; /2/ 72; /7/ 79

Eine el. Quelle kann folgendermaßen allgemein beschrieben werden:



el. Quelle

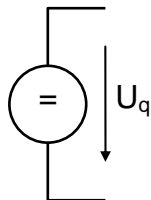
Für diese Schaltung gibt es bezüglich R_a 2 Extrembeschaltungen:



Eine ideale Quelle sollte unabhängig von der Beschaltung eine Spannung oder einen Strom liefern. Nach dem Ohmschen Gesetz müßte dann der Strom oder die Spannung unendlich werden können.

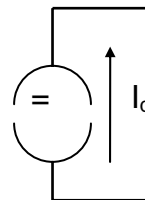
Reale Quellen können durch eine ideale Quelle und einen geeignet beschalteten Widerstand, der alle Verluste beinhaltet, beschrieben werden. Dabei werden 2 Arten von idealen Quellen unterschieden:

ideale Spannungsquelle



U_q ist unabhängig von der Belastung
 \Rightarrow Die Quelle kann einen beliebig großen Strom liefern
 Der Innenwiderstand R_i ist 0, gemessen an den Klemmen

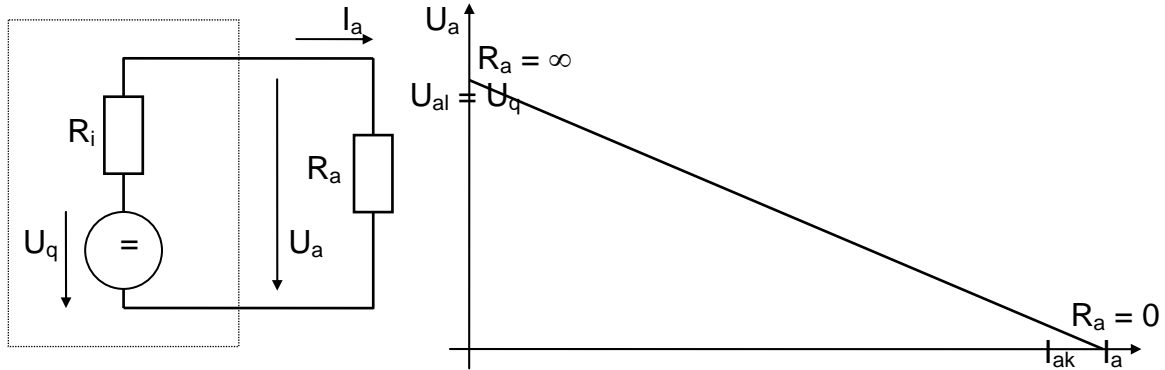
ideale Stromquelle



I_q ist unabhängig von der Belastung
 \Rightarrow Die Quelle kann eine beliebig große Spannung erzeugen
 Der Innenwiderstand R_i ist unendlich, gemessen an den Klemmen

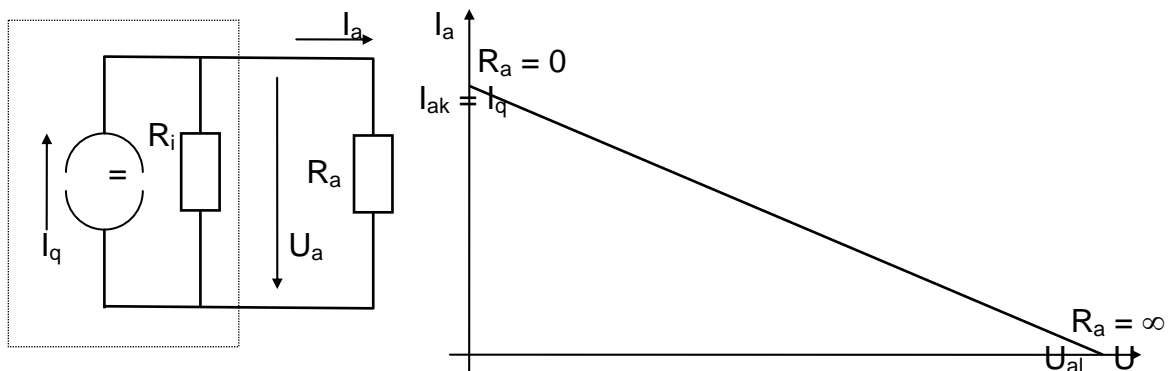
- reale Spannungs- und Stromquelle /2/ 77,150

a) Die reale Spannungsquelle



Bei einer guten realen Spannungsquelle muß $R_i \ll R_a$ sein. Damit minimieren sich die Verluste, die durch die Energieerzeugung und den Transport entstehen. Die meisten Spannungsquellen sind kurzschlußfest (sollten sie immer einsetzen). Sie schalten die Spannungsquelle bei Überlastung ab.

b) Die reale Stromquelle



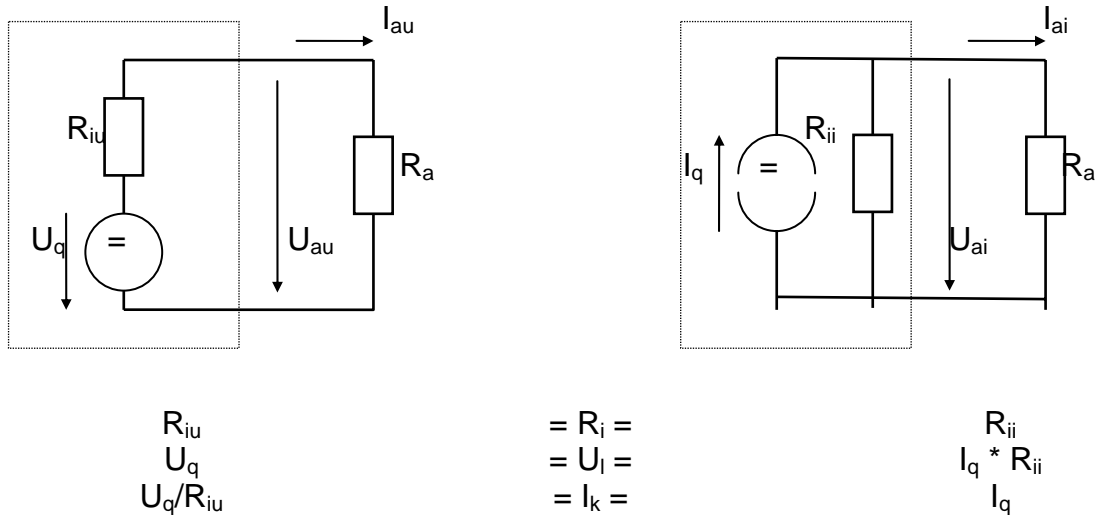
Bei einer guten realen Stromquelle muß $R_i \gg R_a$ sein. Damit minimieren sich die Verluste, die durch die Energieerzeugung und den Transport entstehen. Die meisten Stromquellen sind leerlaufest (sollten sie immer einsetzen). Sie schalten die Stromquelle bei Überlastung ab.

c) Umrechnung der Quellenart

Beide Quellenarten verhalten sich dann gleich, wenn die Werte:

I_{ak} , U_{al} und R_i

gleich sind. Da beide Quellenarten durch eine Gerade beschrieben werden, reichen 2 Bedingungen für das Umrechnen aus. Die dritte ist dann automatisch erfüllt.



Bei der Berechnung des Innenwiderstandes wird an den Anschlüssen der realen Quelle in die Quelle hineingemessen. Dabei muß beachtet werden, daß die ideale Spannungsquelle den Widerstand 0 und die ideale Stromquelle den Widerstand ∞ hat.

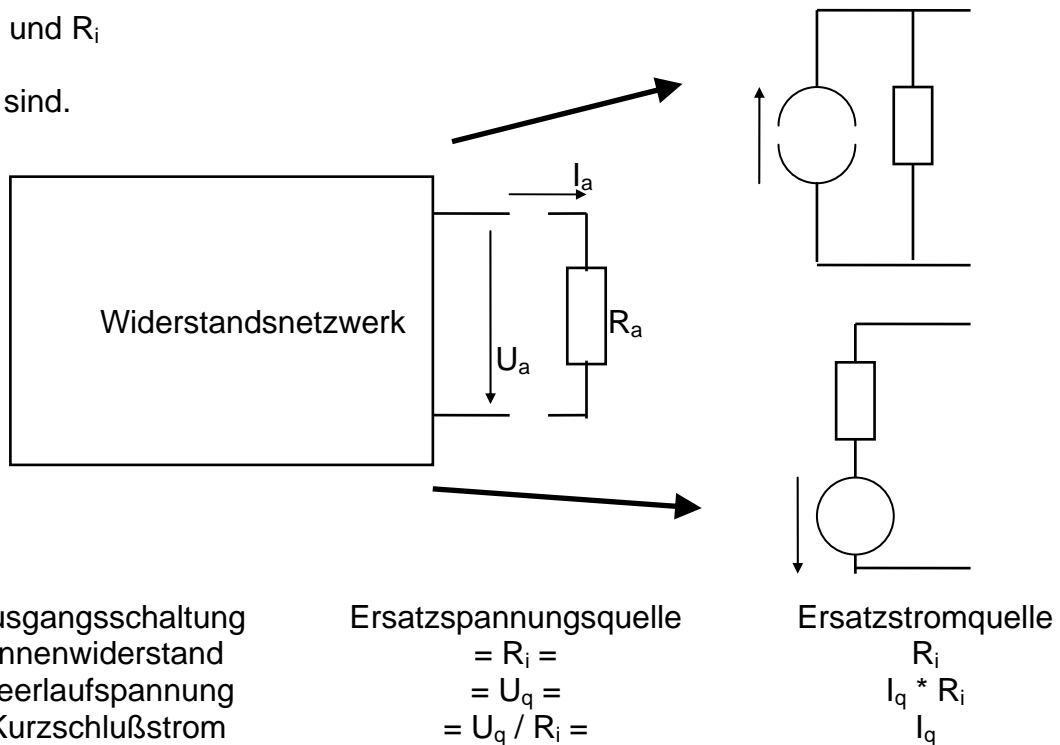
Die Umwandlung einer Quelle führt zu einer Änderung der Topologie der Schaltung.

- Ersatzquellen /1/ 68,378; /2/ 134; /4/ 72

Jedes Widerstandsnetzwerk mit einer Quelle kann zu einer realen Quelle zusammengefaßt werden. Ersatzquelle und Ausgangsschaltung verhalten sich wiederum dann gleich, wenn

I_{ak} , U_{al} und R_i

gleich sind.



Bei der Berechnung des Innenwiderstandes wird an den Anschlüssen der Ausgangsschaltung in die Schaltung hineingemessen. Dabei muß beachtet werden, daß die ideale Spannungsquelle den Widerstand 0 und die ideale Stromquelle den Widerstand ∞ hat.

2.2.5 Überlagerungssatz

/1/ 65, 72; /2/ 108; /3/ 68

- Grundgedanken und Bedingungen /2/ 147

Voraussetzung für die Anwendung des Überlagerungssatzes ist, daß die Schaltung aus linearen Elementen besteht. Dies bedeutet, daß diese nicht von Strom und Spannung abhängig sind. Für die Bauteile R, L, C trifft dies meist zu.

Als Gleichung formuliert lautet der Überlagerungssatz:

$$y = f(x_1, \dots, x_n) = f_1(x_1) + \dots + f_n(x_n)$$

Das bedeutet: Die Gesamtwirkung von n Einflußgrößen kann als Summe der Einzelwirkungen beschrieben werden.

Bei Netzwerken mit mehreren Quellen spielt dies eine Rolle. Damit können solche Netzwerke mit folgendem Verfahren berechnet werden:

- Vereinfachen, so weit möglich

- - Alle idealen Quellen, bis auf eine Quelle (I_{qi} oder U_{qi}), werden durch ihren idealen Innenwiderstand ersetzt (bei $U_q = 0$, bei $I_q = \infty$).
- für $i = 1 \dots n$
- Berechnung der Teilströme oder Teilspannungen aufgrund der vorhandenen Quelle.
- Addieren der Teilergebnisse (Pfeilung beachten)

Mit diesem Verfahren wird ein Netzwerk mit mehreren Quellen auf das Problem einer Schaltung mit einer Quelle zurückgeführt.

2.3 Der Kondensator

2.3.1 Kapazität des Kondensators

/1/ 129; /2/ 43; /3/ 176; /6/ 73; /7/ 162

- Grundaufbau und Berechnung des Kondensators /3/ 187; /7/ 168

Erklärung des elektrischen Feldes und der Kapazität anhand des Plattenkondensators.

Elektrisches Feld: *Der Raum um elektrisch geladene Körper befindet sich in einem besonderen Zustand. Dieser besondere Zustand wird elektrisches Feld genannt.*

Man denkt sich das elektrische Feld aus Feldlinien bestehend. Diesen ist eine Richtung zugeordnet, die von der positiven Ladung ausgeht und in der negativen Ladung endet. Legt man an zwei benachbarte, voneinander isolierte, elektrisch leitfähige Körper eine Spannung an, so werden diese beiden Körper geladen. Die Größe dieser Ladung Q , die die beiden Körper aufnehmen können, hängt von der Ausdehnung, Form und Stärke des elektrischen Feldes ab. Das entstehende elektrische Feld ist abhängig von der angelegten Spannung, von den Abmessungen der beiden Körper und vom Abstand, den sie voneinander haben.

Diesen Einfluß, den die Körperabmessungen, ihr gegenseitiger Abstand und der zwischen ihnen befindliche isolierende Stoff auf die Aufnahmefähigkeit elektrischer Ladung haben, nennt man **Kapazität**. Kapazität heißt Fassungsvermögen, Aufnahmefähigkeit. Die Kapazität ist der Proportionalitätsfaktor zwischen der Ladung Q und der Spannung U .

$$Q = C * U$$

Q = elektrische Ladung

C = Kapazität

U = Spannung

aus der Gleichung $Q = C * U$ ergibt sich die Einheit der Kapazität. Die elektrische Ladung hat die Einheit Amperesekunden (As) = Coulomb.

$$C = \frac{Q}{U}$$

$$[C] = \frac{As}{V} = F$$

Die Einheit As/V wird Farad (F) genannt. Das Farad ist eine recht große Einheit. Folgende Teile dieser Einheit sind üblich:

$$1 \text{ Millifarad} = 1mF = 10^{-3} F$$

$$1 \text{ Mikrofarad} = 1\mu F = 10^{-6} F$$

$$1 \text{ Nanofarad} = 1nF = 10^{-9} F$$

$$1 \text{ Picofarad} = 1pF = 10^{-12} F$$

Eine Anordnung leitfähiger Körper hat die Kapazität von 1 Farad, wenn beim Anlegen einer Spannung von

1 Volt eine Ladung von 1 Coulomb aufgenommen wird.

Kapazität ist die Eigenschaft, unter dem Einfluß einer Spannung elektrische Ladungen speichern zu können.

Kondensatoren sind Bauteile, die eine gewollte Kapazität bestimmter Größe haben. Diese Nennkapazität kann innerhalb eines bestimmten Toleranzbereiches schwanken. Sie ist außerdem temperaturabhängig.

Der zwischen den beiden elektrisch leitfähigen Körpern (Belägen) befindliche Isolierstoff wird Dielektrikum genannt. Das Dielektrikum hat eine bestimmte Durchschlagfestigkeit. Durch diese Durchschlagfestigkeit ist die höchste Spannung, die an den Kondensator angelegt werden darf, bestimmt.

Man unterscheidet Gleichspannungskondensatoren und Wechselspannungskondensatoren.

Gleichspannungskondensatoren sind für den Betrieb an Gleichspannung gebaut. Sie dürfen nur in Sonderfällen mit (kleiner) Wechselspannung betrieben werden.

Wechselspannungskondensatoren dürfen sowohl an Wechsel- als auch an Gleichspannung betrieben werden.

Die Größe der Kapazität hängt von der Fläche ab, auf der sich die beiden Beläge gegenüberstehen, vom Abstand der beiden Beläge und von der Dielektrizitätszahl ϵ_r des Dielektrikums.

Für einen Plattenkondensator gilt:

$$C = \frac{\epsilon_0 * \epsilon_r A}{a}$$

C Kapazität

ϵ_0 Dielektrizitätskonstante

$$\epsilon_0 = 8,85 * 10^{-12} \frac{F}{m}$$

ϵ_r Dielektrizitätszahl

A Fläche, auf der sich die beiden Beläge gegenüberstehen

a Abstand der Beläge

Um große Kapazitäten zu erreichen, verwendet man statt Platten Metallfolien oder metallische Kunststoffolien, die mit zwischengelegten Isolierschichten aufgerollt werden.

2.3.2 Energie des geladenen Kondensators

- Speicherfähigkeit /1/ 138; /2/ 60; /6/ 79; /7/ 184

Der geladene Kondensator hat die elektrische Energie gespeichert. Die Größe der gespeicherten Energie ergibt sich aus folgender Gleichung:

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

W elektrische Energie
C Kapazität
U Spannung

2.3.3 Schaltungen im Gleichstromkreis

/4/ 162; /5/ 12

- Reihenschaltung

Für n in Reihe geschaltete
Kondensatoren gilt:

$$\frac{1}{C_g} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

- Parallelschaltung

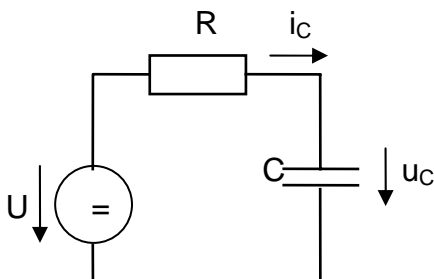
Gesamtkapazität von n
parallelgeschalteten Kondensatoren:

$$C_g = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$$

- DGL /57 268; /77 176; /19/ 23,244

Wird ein nicht geladener Kondensator an Spannung gelegt, so sind Strom und Spannung am Kondensator nicht konstant. Für zeitvariante Größen werden in der Regel Kleinbuchstaben eingesetzt.

Die Grundschaltung für den Kondensator sieht folgendermaßen aus:



Für den Kondensator gilt:

$$u_c = \frac{Q}{C}$$

Die Ladung Q berechnet sich aus:

$$Q = \int_0^t i(t) dt$$

Damit gilt für die Kondensatorspannung:

$$u_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt$$

oder

$$i(t) = C \frac{du_c(t)}{dt}$$

Der Maschensatz ergibt:

$$U = R \cdot i_c(t) + u_c(t) = R \cdot C \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t)$$

Dies ist eine inhomogene Differentialgleichung. Die Lösung der DGL lautet:

$$u_c(t) = u_{c0} e^{-\frac{t}{T}} + U \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad \text{mit } T = R \cdot C$$

Für den Strom im Kondensator gilt:

$$i(t) = C \frac{du_c(t)}{dt} = -\frac{u_{c0}}{R} e^{-\frac{t}{T}} + \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{T}}$$

Dabei beschreibt der erste Term den transienten Anteil der Lösung der DGL, den Entladevorgang. Wobei u_{c0} die Anfangsbedingung, also den Ladezustand zum Zeitpunkt 0 darstellt. Der zweite Term beschreibt den stationären Anteil der Lösung der DGL, der nur von der treibenden Kraft U abhängig ist.

- Grundverhalten /6/ 78

Zeitlicher Verlauf von U und I beim Ladevorgang

Der ungeladene Kondensator hat im Einschaltmoment den Widerstand Null.
Der geladene Kondensator hat einen fast unendlich großen Widerstand. Er sperrt den Gleichstrom.



Beim Ladevorgang steigt die Spannung u_c an. u_c wirkt dem Strom entgegen. \Rightarrow Bremswirkung.
Für
 $t=T \Rightarrow 63,2\%$
 $t=2T \Rightarrow 86,5\%$
 $t=3T \Rightarrow 95\%$
 $t=4T \Rightarrow 98,2\%$
 $t=5T \Rightarrow 99,3\%$



Beim Ladevorgang sinkt der Strom i_C auf 0. u_C wirkt dem Strom entgegen. \Rightarrow Bremswirkung.

Für

$$t=T \Rightarrow 36,8\%$$

$$t=2T \Rightarrow 13,5\%$$

$$t=3T \Rightarrow 5\%$$

$$t=4T \Rightarrow 1,8\%$$

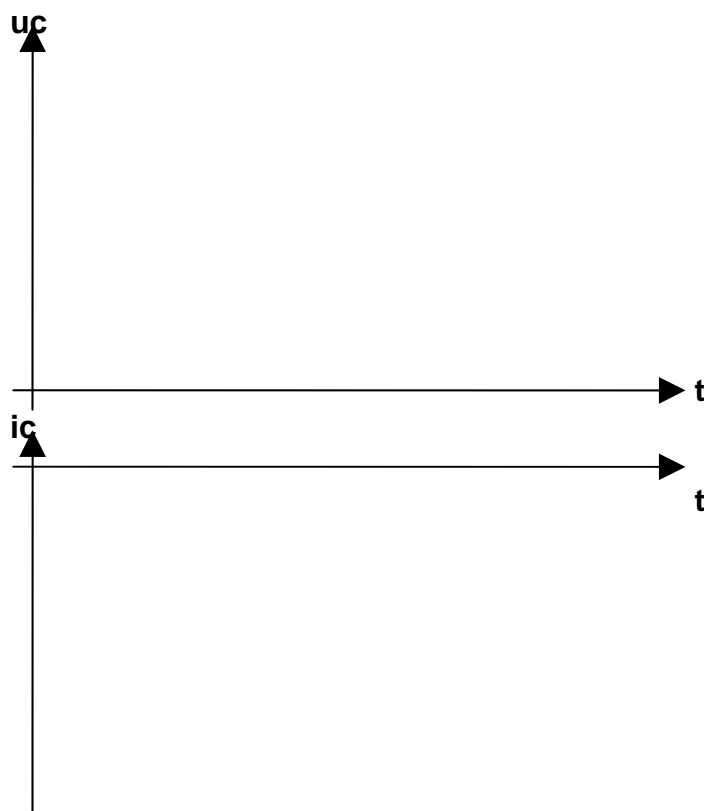
$$t=5T \Rightarrow 0,7\%$$

Zeitlicher Verlauf von U und I beim Entladevorgang

Der geladene Kondensator wirkt wie eine Spannungsquelle mit außerordentlich geringen Innenwiderstand. Werden die Klemmen eines Kondensators kurzgeschlossen, so fließt im ersten Augenblick ein sehr großer Strom. \Rightarrow Der Kondensator wird sehr schnell entladen.

Eine solche Kurzschlußentladung ist vor allem bei Kondensatoren großer Kapazität gefährlich. Der Kondensator kann durch den großen Strom beschädigt werden.

Kondensatoren sollten stets über einen Widerstand entladen werden.



Beim Entladevorgang sinkt die Spannung u_C auf 0. Für

$$t=T \Rightarrow 36,8\%$$

$$t=2T \Rightarrow 13,5\%$$

$$t=3T \Rightarrow 5\%$$

$$t=4T \Rightarrow 1,8\%$$

$$t=5T \Rightarrow 0,7\%$$

Beim Entladevorgang sinkt der Strom i_C auf 0. Entsprechend der Pfeilung ist der Strom negativ, er fließt aus dem Kondensator heraus. Für

$$t=T \Rightarrow 36,8\%$$

$$t=2T \Rightarrow 13,5\%$$

$$t=3T \Rightarrow 5\%$$

$$t=4T \Rightarrow 1,8\%$$

$$t=5T \Rightarrow 0,7\%$$

2.3.4 Bauformen des Kondensators

- Bauteile /6/ 82; /7/ 369

Die Eigenschaften eines Kondensators werden durch seine Kennwerte beschrieben.

Die **Nennkapazität** ist auf dem Kondensator angegeben. Die Stufung erfolgt wie bei Widerständen in IEC-Reihen.

Die **Herstellungstoleranz** wird entweder vollständig oder codiert durch Farbkennzeichnung bzw. Kennbuchstaben angegeben.

Die **Nennspannung** kann als Gleichspannung oder als Wechselspannung angegeben werden. Sie wird auf eine Umgebungstemperatur von 40° bezogen.

Der **Temperaturbeiwert**, α_c auch Temperaturkoeffizient TK genannt, gibt die Kapazitätsänderung je Kelvin Temperaturänderung an. Die Kapazitätsänderung lässt sich ähnlich wie die Widerstandsänderung mit der Formel $dC = C_{20} * \alpha_c * \Delta\vartheta$ errechnen.

- Anwendungen

Kondensator als elektrischer Widerstand

z.B.: Wirk- oder Blindwiderstand in einem Kondensatormotor

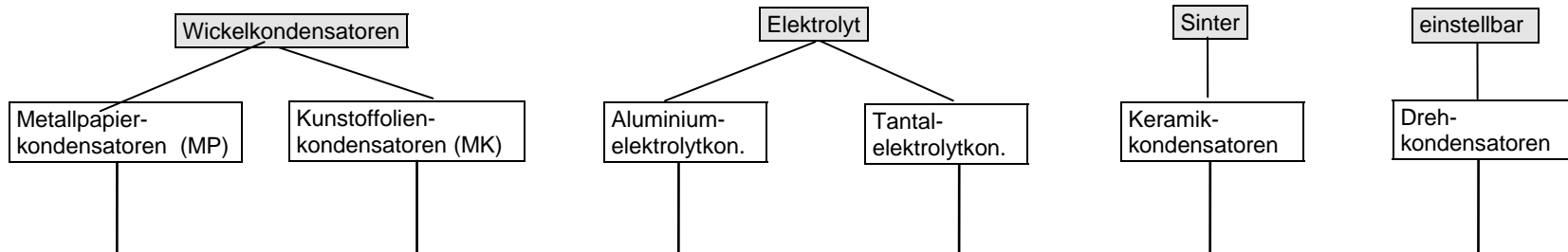
Kondensatoren als Energiespeicher bzw. Spannungsquelle

z.B.: Kondensatorglättung : Lade- und Siebkondensatoren zum Glätten der Gleichspannung
dämpfen oder unterdrücken von Spannungsspitzen (z. B. an Halbleiterelementen)
Abschirmen von äußeren elektrischen Störfeldern (z.B. elektrisches Feld der Netzspannung)

Kondensatoren zur Frequenzabstimmung

z.B.: Abstimmung von Schwingkreisen in der Rundfunk- und Fernsehtechnik (Feinabstimmung)

Bauarten von Kondensatoren



Aufbau	Metallfolie und Dielektrikum (Papier)	Metallschicht und Dielektrikum (Kunststoffolie)	Aluminiumfolie und Dielektrikum (Elektrolyt)	Tantalfolie und Dielektrikum (Elektrolyt)	Dielektrikum (Keramikmasse)	kammerartiges Plattensystem
Besonderheiten	Selbsteilung nach einem Durchschlag	Selbsteilung nach einem Durchschlag	Nur bedingt mit Wechselspannung betreibbar (bis 2V) sehr hohe Kapazitätswerte	Nur bedingt mit Wechselspannung betreibbar (bis 2V) sehr hohe Kapazitätswerte	kleine Kapazitätswerte	Verstellbar ; kleine Kapazitätswerte
Nennspannung	200 V bis 5 kV	50 V bis 2 kV	6 V bis 600 V	6 V bis 125 V	4 V bis 500 V	
Kapazitätsbereich	100 pF bis 10 mF	100 pF bis 10 µF	1 µF bis 1 F	100 nF bis 1 mF	1 pF bis 1 µF	2 pF bis 500pF
Anwendungsbereich	Motor-, Filter-, Stoß- u. Funkenstörkondensatoren	Motor-, Filter-, Stoß- u. Funkenstörkondensatoren	Energiespeicher, Sieben bei niedrigen und hohen Frequenzen	Meß- und Regelungstechnik, Datentechnik, Kommunikationstechnik, Schaltnetzteile	Datentechnik, Kfz-Elektronik, Kommunikationstechnik, automatisch bestückbar auf Leiterplatten	Resonanzkreise, Nachrichtentechnik
Bauform						
Kosten ca. (Kapazitätsabhängig, je höher desto teurer)	-. 55 bis 5.- DM/Stück	-. 55 bis 5.- DM/Stück	-.50 bis 12.- DM/Stück	-. 50 bis 6.- DM/Stück	-. 20 bis 1.- DM/Stück	1.- bis 9.- DM/Stück

2.4. Die Spule

2.4.1 Induktivität einer Spule

/1/ 199; /2/ 36; /3/ 141,172; /7/ 236

- Grundaufbau und Berechnung der Spule /5/ 37

Magnetisches Feld:

Jeder elektrische Strom hat in seiner Umgebung ein magnetisches Feld. Diese Felder werden durch Feldlinien dargestellt, deren Richtung von der Stromrichtung abhängt. (Rechtehandregel).

Magnetische Feldlinien sind geschlossene Linien, die sich weder schneiden noch berühren.

Magnetfelder mehrerer stromdurchflossener Leiter überlagern sich und bilden ein Gesamtmagnetfeld. Dieses elektrisch erzeugte Magnetfeld stellt eine Energiespeicherung dar. Wiederum erzeugt ein sich änderndes Magnetfeld eine Kraft auf die Ladung in einem Leiter.

Induktion und Selbstinduktion:

Mit Hilfe magnetischer Felder kann man auf elektrisch geladene Teilchen Kräfte ausüben. Ladungsträger werden getrennt. Es wird eine Spannung erzeugt, auch induzierte Spannung genannt.

Diese Induktion kann auf zwei Wegen hervorgerufen werden:

1. Liegt eine Leiterschleife in einem sich änderndem Magnetfeld, so wird in ihr eine Spannung induziert.

z.B.: Radioempfänger: Die elektromagnetischen Wellen eines Radiosenders verursachen in der Empfangsantenne eine Änderung des magnet. Feldes. => Spannung wird induziert.

2. Ein Leiter wird in einem magnet. Feld bewegt:

z.B. beim Generator: Eine drehbare Leiterschleife wird in einem Magnetfeld angebracht. Beim Drehen wird Spannung erzeugt. Sobald der Leiter nicht mehr bewegt wird und die magn. Feldlinien nicht mehr schneiden verteilen sich die Elektronen wieder. => $U = 0$

Es hängt also von der Stärke der Magnetfeldänderung ab, wie stark die Auswirkungen sind.

$$u_l = N \frac{d\phi}{dt}$$

Φ = magnetischer Fluß
N = Windungszahl
 u_l = erzeugte Spannung

Der magnetische Fluß berechnet sich aus:

$$\phi = \frac{\Theta}{R_m} = \frac{N\mu A}{l} i(t)$$

l = mittlere Feldlinienlänge
 Θ = magnetische Spannung
 R_m = magnetischer Widerstand
 A = Querschnitt der Spule

$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$; $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ Vs/Am Permeabilitätskonstante; μ_r = relative Permeabilität

Damit ergibt sich für die Spule:

$$u(t) = N^2 \frac{\mu A}{l} \frac{di(t)}{dt} = L \frac{di(t)}{dt}$$

L = Induktivität

Die Induktivität ist die Fähigkeit, bei einer Stromänderung, durch ein möglichst starkes Magnetfeld eine Spannung zu erzeugen.

2.4.2 Energie der geladenen Spule

- Speicherkapazität /1/ 208; /2/ 59

Eine Spule, in der Strom fließt, hat Energie in Form eines Magnetfeldes gespeichert. Die Größe der gespeicherten Energie ergibt sich aus folgender Gleichung.

$$W = \frac{1}{2} L \cdot I_0^2$$

W elektrische Energie
 L Induktivität
 I_0 Strom durch die Spule

2.4.3 Schaltungen im Gleichstromkreis

- Reihenschaltung

Für n in Reihe geschaltete Spulen gilt:

$$L_{ges} = L_1 + L_2 + L_3 + \dots$$

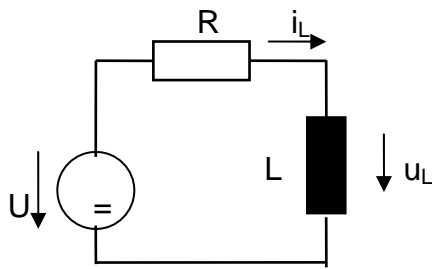
Parallelschaltung

Für n parallel geschaltete Spulen gilt:

$$\frac{1}{L_{ges}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots$$

- DGL /5/ 273; /7/ 241; /10/ 26, 247

Die Grundschaltung für die Spule sieht folgendermaßen aus:



Mit den obigen Gleichungen ergibt sich für den Maschensatz:

$$u = R \cdot i_L(t) + u_L(t) = R \cdot i_L(t) + L \frac{di_L(t)}{dt}$$

Dies ist eine inhomogene DGL. Die Lösung der DGL lautet:

$$i_L(t) = i_{L0} e^{-\frac{t}{T}} + \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad \text{mit } T = L/R.$$

Für die Spannung in der Spule gilt:

$$u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -i_{L0} \cdot R e^{-\frac{t}{T}} + U e^{-\frac{t}{T}}$$

Dabei beschreibt der erste Term den transienten Anteil der Lösung der DGL, den Entladevorgang. Wobei i_{L0} die Anfangsbedingung, also den Ladezustand zum Zeitpunkt 0 darstellt. Der zweite Term beschreibt den stationären Anteil der Lösung der DGL, der nur von der treibenden Kraft U/R abhängig ist.

- Grundverhalten

Zeitlicher Verlauf von U und I beim Ladevorgang

Die ungeladene Spule hat im Einschaltmoment den Widerstand ∞ . Die geladene Spule hat einen Widerstand, der nur durch den Widerstand des Wicklungsdrahtes gebildet wird. Idealisiert wird er meist als 0 angenommen.



Beim Ladevorgang steigt der Strom i_L an. Für
 $t=T \Rightarrow 63,2\%$
 $t=2T \Rightarrow 86,5\%$
 $t=3T \Rightarrow 95\%$
 $t=4T \Rightarrow 98,2\%$
 $t=5T \Rightarrow 99,3\%$



Beim Ladevorgang sinkt die Spannung u_L auf 0. Für
 $t=T \Rightarrow 36,8\%$
 $t=2T \Rightarrow 13,5\%$
 $t=3T \Rightarrow 5\%$
 $t=4T \Rightarrow 1,8\%$
 $t=5T \Rightarrow 0,7\%$

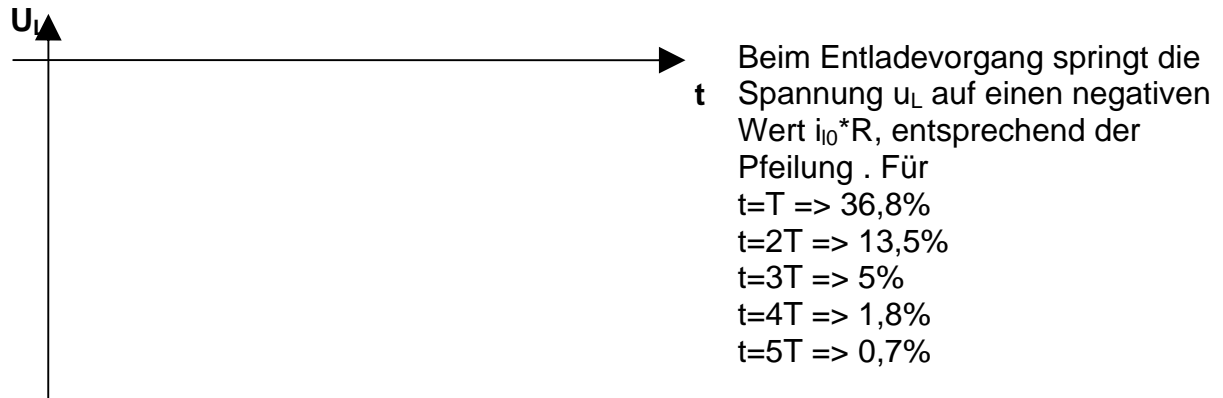
Zeitlicher Verlauf von U und I beim Entladevorgang

Die geladene Spule wirkt wie eine Stromquelle mit außerordentlich großem Innenwiderstand. Werden die Klemmen einer Spule geöffnet, so entsteht im ersten Augenblick eine sehr große Spannung durch die große Stromänderung. Eine solche Stromunterbrechung ist bei Spulen gefährlich. Die Spule kann den Schaltkontakt beschädigen.

Spulen sollten stets über eine Freilaufdiode entladen werden.



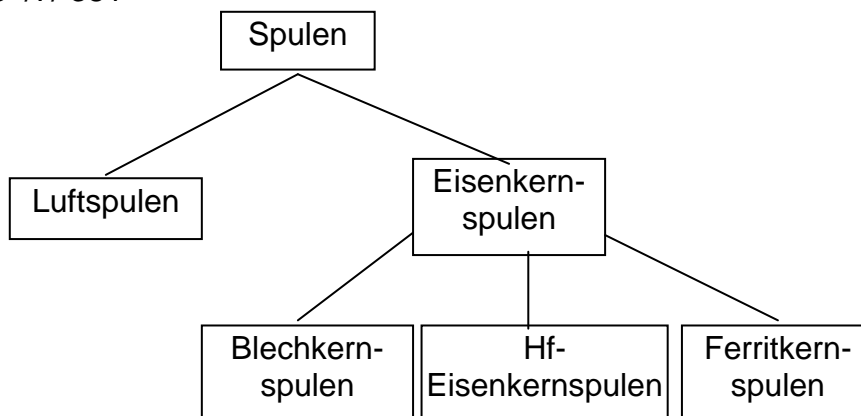
Beim Entladevorgang sinkt der Strom i_L auf 0. Für
 $t=T \Rightarrow 36,8\%$
 $t=2T \Rightarrow 13,5\%$
 $t=3T \Rightarrow 5\%$
 $t=4T \Rightarrow 1,8\%$
 $t=5T \Rightarrow 0,7\%$



Maßgeblich für die auftretende Spannung ist der beim Ausschalten wirksame Widerstand.

2.4.4 Bauformen der Spule

- Bauteile /7/ 381



Luftspulen :

Luftspulen werden in verschiedenen Formen gebaut !
Eine Luftspule besteht nur aus Wicklungen, d.h. es gibt weder Spulenkörper noch Kern.

Die **Zylinderspule** ist die einfachste Form der Spulen. Trotzdem wird sie verwendet wenn kleine Induktivitäten gebraucht werden. Der Grund ist, daß durch die Bauform der Spule ein leichtes Bestücken der Platine ermöglicht wird, sowie geringe Herstellungskosten.

Eine häufig verwendete Bauform ist die **Kreisringspule**, auch **Toroidspule** genannt. Die magnetischen Feldlinien verlaufen bei der **Kreisringspule** fast ausschließlich im Spuleninnern.

Diese Eigenschaft wird dann benötigt, wenn ich andere sehr empfindliche Bauteile vor Einstörungen schützen möchte.

Flachspulen können Spiralförmig oder Rechteckförmig sein. Sie können leicht in Leiterplatten eingetätzt werden. Es lassen sich jedoch nur verhältnismäßig kleine Induktivitäten auf diese Weise herstellen.

Eisenkernspulen:

Allgemein bestehen Eisenkernspulen aus einem **Spulenkörper** und einer **Wicklung**, sowie aus einem **Kern**.

Blechkerne :

Sie werden aus geschichteten Blechen aufgebaut, die gegeneinander isoliert sind, um die Wirbelströme gering zu halten. Kerne dieser Art sind nur für verhältnismäßig niedere Frequenzen zu verwenden, etwa bis 20 kHz. Bei höheren Frequenzen werden die Wirbelstromverluste zu groß.

Hf-Eisenkerne (Hochfrequenzeisenkerne) :

Sie bestehen aus einem Eisenpulver oder einem Pulver eines anderen ferromagnetischen Metalls das mit einem Kunststoff vermengt wird, bis fast jedes Pulverkörnchen eine isolierende Kunststoffschicht um sich herum hat. Dann wird die Mischung in Formen gegossen und der Kunststoff härtet aus. In diesen Kernen können sich nur geringe Wirbelströme ausbilden, da das Metall sehr fein unterteilt ist. Die Kerne sind für Hochfrequenzspulen geeignet.

Ferritkerne :

Sie werden aus elektrisch nichtleitenden Metalloxiden gefertigt. Es gibt weichmagnetische und hartmagnetische Ferrite. Aus weichmagnetischen Ferriten werden sehr oft hochwertige Spulenkern gefertigt. Die Metalloxide werden in die gewünschten Formen gepreßt. Ferritkerne haben sehr geringe Verluste. Da sie elektrisch nicht leitfähig sind, können sich praktisch auch keine Wirbelströme ausbilden. Sie sind für hohe Frequenzen geeignet.

Kernformen:

E-Kerne : Werden als Übertrager verwendet. Vorwiegend im Nf -Bereich.
Vorteil : maschinell sehr einfach zu wickeln

Stabkerne : z.B. als induktive Antennen in netz- und batteriebetriebenen Rundfunkempfängern

Gewindekerne : Wird verwendet wenn die Induktivität spezifisch eingestellt werden muß, z.B. bei Radioempfängern. Als Ferritkerne:
Nachteil: brechen relativ schnell beim Einstellen der Induktivität.

- Anwendungen /4/ 174

Im Gleichstromkreis werden Spulen zur Betätigung oder Krafterzeugung eingesetzt. Dabei dient meist ein Eisenkern zur Bündelung des Magnetfeldes. Beispiele sind:

- Ventile
- Schütze, Relais

Klingel

Jede Wicklung, aber auch z.B. eine lange Leitung stellt genau genommen eine Induktivität dar.

In der Schaltungstechnik werden Spulen möglichst vermieden, da sie produktionstechnisch nicht so gut zu handhaben sind und die Magnetfelder andere Bauteile stören können.

Gitarrentonabnehmer vom Typ "Single Coil":

Eine Stahlsaite, die relativ dicht über dem Tonabnehmer schwingt, bewirkt eine ständige Veränderung des Magnetfelds. In der Tonabnehmerspule entsteht eine Spannung, die entsprechend der mechanischen Saitenschwingung in Frequenz und Amplitude (Lautstärke) schwankt.

Kenngößen:

Kosten: ca. 120-250 DM
Herstellungsland: USA
Einbaugröße: genormt
Drahtdm.: ca. 0,1 mm
Windungszahl: etliche tausend
stark unterschiedlich, mehr
Windungen bewirken höheren Output

Kosten:

Kerne :

E-Kerne Nf 3,25 - 10,25 DM

Gewindekerne + Spulenkörper 1,40 DM

Ferrit-Stabkerne 0,75 DM

Spulen:

Luftspulen (hochwertig): 0,1 mH 3,60 DM
5,6 mH 30,50 DM

Luftspulen (niederwertig): 0,12 mH 2,65 DM
3,3 mH 9,95 DM

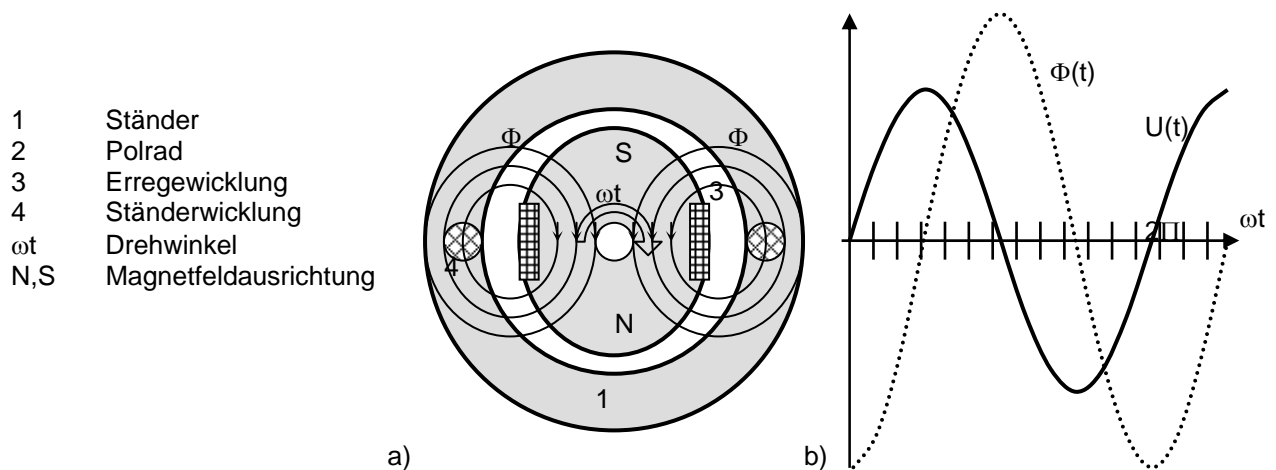
Feritspulen (High-Quality) : 2,2 mH 14,75 DM
15 mH 20,20 DM

3. Wechselstromtechnik

3.1 Erzeugung von Wechselspannung

/2/ 65

In einer Spule wird ein Strom erzeugt, wenn sich der magnetische Fluß durch die Spule ändert. Das nachfolgende Bild stellt eine Querschnitt durch einen Wechselspannungsgenerator dar. In dem rohrförmigen Ständer 1 befindet sich eine Ständerwicklung 4, und in dem Ständer bewegt sich das Polrad 2 mit der Erregerwicklung 3, die von einem Gleichstrom durchflossen wird und so den magnetischen Fluß erzeugt. Der Luftspalt zwischen Ständer und Polrad erweitert sich zu den Polen hin, um eine annähernd sinusförmige Induktionsverteilung im Luftspalt zu erreichen.



Querschnitt (a) durch einen Wechselspannungsgenerator und zeitlicher Verlauf (b) seines magnetischen Flusses Φ und der Quellenspannung U .

Für die Spannung ergibt sich damit:

$$u_q(t) = N \frac{d\Phi(t)}{dt} = \omega N \hat{\Phi} \sin(\omega t) = \hat{u}_q \sin(\omega t)$$

Der weit aus größte Teil der elektrischen Energie wird heute in Generatoren erzeugt, die nach diesem Prinzip aufgebaut sind. Beispiele sind die Lichtmaschine im Kraftfahrzeug oder der Dynamo am Fahrrad. Für größere Anwendungen wird der Ständer mit 2 weiteren Wicklungen versehen, so daß 3, jeweils um 120° verschobene Wicklungen vorhanden sind. Damit wird der Ständer besser ausgenutzt und es entstehen 3 Spannungen, deren Sinuskurve jeweils um 120° verschoben ist, der sogenannte Drehstrom.

Sinusförmige Kenngrößen können wie folgt beschrieben werden:

$$u(t) = \hat{u} \sin \omega t = \hat{u} \sin \frac{2\Pi}{T} t; \text{ mit } f = \frac{1}{T}$$

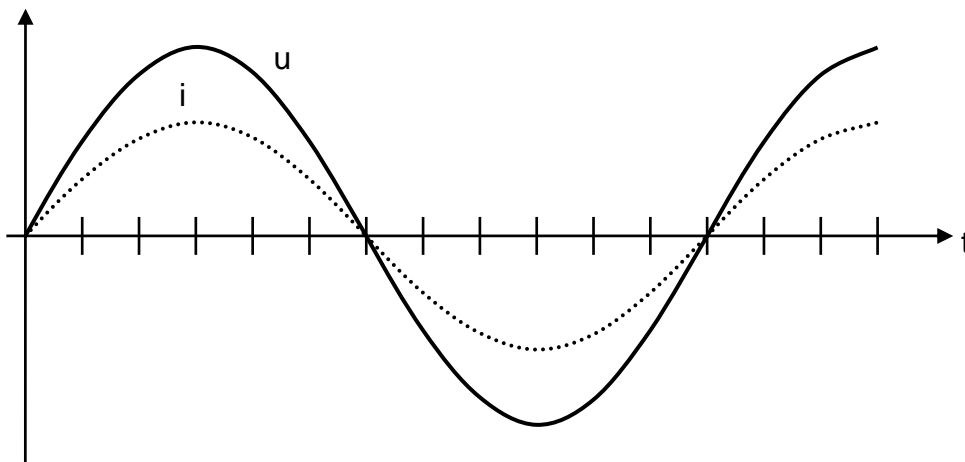
f = Frequenz; \hat{u} = Amplitude

und

$$i(t) = \hat{i} \sin(\omega t + \varphi) = \hat{i} \sin\left(\frac{2\Pi}{T} t + \varphi\right)$$

 \hat{i} = Amplitude

φ beschreibt eine mögliche Phasenverschiebung des Stromes gegenüber der Spannung.



Im Falle eines Drehstroms ergeben sich folgende Gleichungen:

$u_R(t) = \hat{u}_R \sin \omega t$	$i_R(t) = \hat{i}_R \sin(\omega t + \varphi_R)$
$u_S(t) = \hat{u}_S \sin(\omega t + 120^\circ)$	$i_S(t) = \hat{i}_S \sin(\omega t + 120^\circ + \varphi_S)$
$u_T(t) = \hat{u}_T \sin(\omega t + 240^\circ)$	$i_T(t) = \hat{i}_T \sin(\omega t + 240^\circ + \varphi_T)$

Die Buchstaben R,S,T unterscheiden dabei die 3 Phasen des Drehstromes.

3.2 Signalkenngrößen

- Signalkenngrößen im Zeitbereich /1/ 234; /2/ 188; /7/253; /10/ 16

Mittelwert:

Der Mittelwert einer sinusförmigen Spannung ist:

$$\text{Mittelwert} = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{u} \sin \omega t dt = -\hat{u} \frac{T}{\omega} \cos \omega t \Big|_0^T = 0$$

Effektivwert:

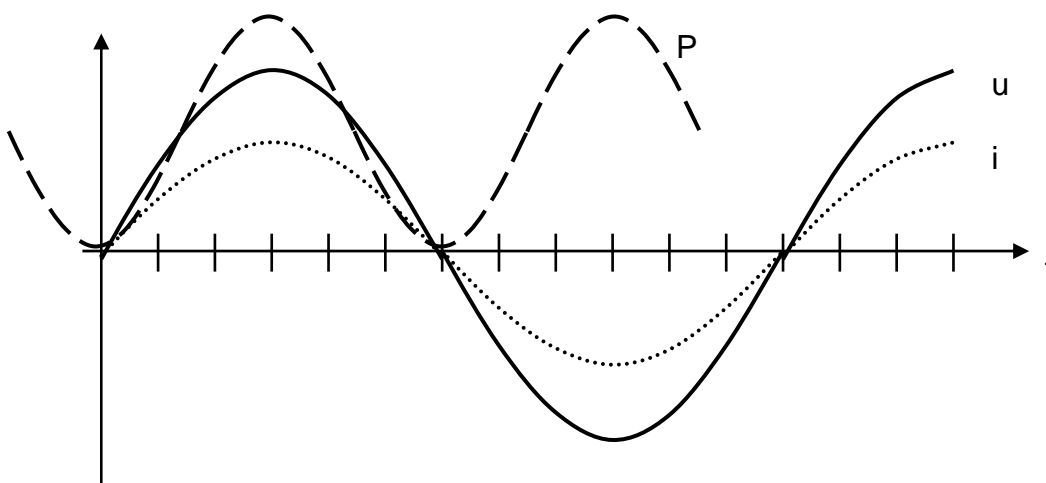
Der Effektivwert einer sinusförmigen Spannung oder eines Stromes ist der Gleichspannungswert oder Gleichstromwert, der die gleiche Leistung erzeugen würde. Dabei wird davon ausgegangen, daß Strom und Spannung nicht phasenverschoben ist.

Für die Leistung gilt:

$$P = u(t)i(t) = \frac{u(t)^2}{R} = i(t)^2 R$$

Der Mittelwert der Leistung, hier für die Gleichung mit der Spannung, berechnet sich:

$$P_m = \frac{\hat{u}^2}{TR} \int_0^T (\sin \omega t)^2 dt = \frac{\hat{u}^2}{TR} \left[\frac{1}{2}t - \frac{1}{4\omega} \sin 2\omega t \right]_0^T = \frac{\hat{u}^2}{2R} = \frac{1}{2} \hat{P} = U_{eff}^2 \frac{1}{R}$$



Damit ergibt sich für die Effektivwerte: $U_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{u}$; oder $I_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{i}$

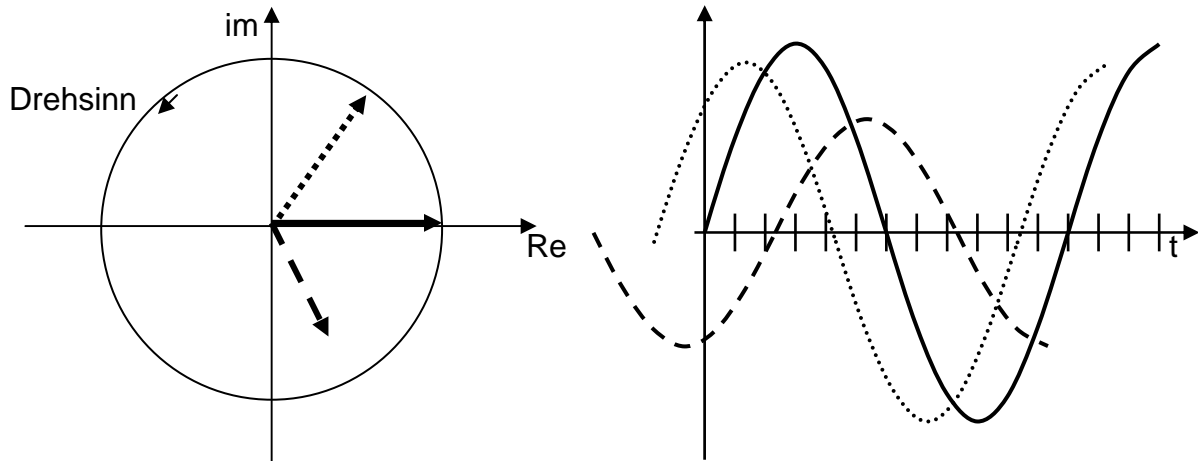
3.3 Berechnungsverfahren von Netzwerken mittels komplexer Zahlen

- Zeigerdarstellung /1/ 308; /2/ 147; /6/ 160; /7/ 264; /10/ 29

Ein sinusförmiges Signal haben wir bisher als Diagramm (Momentanwert in Abhängigkeit von der Zeit) betrachtet. Kenngrößen solcher Signale sind die:

- Amplitude
- Frequenz und
- Phasenverschiebung.

Den gleichen Sachverhalt können wir auch mit einer anderen Darstellung beschreiben, ohne den zeitlichen Verlauf darstellen zu müssen. Stellen wir uns einen Zeiger in der komplexen Ebene vor, der in der Periodendauer der Zeitfunktion einmal durch alle Quadranten rotiert. Konvention ist es dabei, die Sinusfunktion durch einen Zeiger auf der reellen Achse darzustellen. Das bedeutet, daß die Zeitfunktion durch die Projektion des Zeigers auf die imaginäre Achse dargestellt werden kann. Der Drehsinn des Zeigers ist entgegen dem Urzeigersinn festgelegt. Damit liegt auch die Darstellung von Phasenverschiebungen fest.



—	$f_1(t) = \hat{f}_1 \sin(\omega t)$
.....	$f_2(t) = \hat{f}_2 \sin(\omega t + 50^\circ)$
- -	$f_3(t) = \hat{f}_3 \sin(\omega t - 70^\circ)$

- \Re als komplexer Widerstand /1/ 330; /2/ 205; /3/ 219; /5/ 103; /7/ 282; /10/ 38

Bei der Übertragung dieses Sachverhaltes auf die Elektrotechnik wird der Strom als Bezugsgröße auf die reelle Achse gelegt. Der Zusammenhang zwischen Strom und Spannung wird durch die Bauteile R, L und C festgelegt.

Bei einem ohmschen Widerstand wird dieser Zusammenhang durch die Gleichung:

$$u(t) = Ri(t) = R \hat{i} \sin \omega t = \hat{u} \sin \omega t$$

Bei einer Spule gilt:

$$u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} = L \hat{i} \frac{d \sin \omega t}{dt} = \omega L \hat{i} \cos \omega t = \omega L \hat{i} \sin(\omega t + 90^\circ)$$

Das bedeutet, daß die Spule den reellen Zeiger des Stromes auf einen imaginären Zeiger der Spannung abbildet. Wir können also von einem rein imaginären Widerstand bei der Spule ausgehen.

$$\mathfrak{R}_L = j\omega L$$

Bei einem Kondensator gilt:

$$u_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau = \frac{1}{C} \int_0^t \hat{i} \sin \omega \tau d\tau = -\frac{\hat{i}}{\omega C} \cos \omega t = \frac{\hat{i}}{\omega C} \sin(\omega t - 90^\circ) = \hat{u} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

Das bedeutet, daß der Kondensator den reellen Zeiger des Stromes auf einen negativ-imaginären Zeiger der Spannung abbildet, da das negative Vorzeichen sich als eine Phasenverschiebung um 180° darstellen läßt. Wir können also von einem rein negativ-imaginären Widerstand bei dem Kondensator ausgehen.

$$\mathfrak{R}_C = -j \frac{1}{\omega C}$$

Damit wird es möglich, mittels Rechnung mit komplexen Zahlen, die Regeln für die Berechnung von Schaltungen im Gleichstrombereich auch auf den Wechselstrombereich zu übertragen. Dabei werden für Kondensatoren die komplexen Widerstände \mathfrak{R}_C und für die Spulen der Widerstand \mathfrak{R}_L eingesetzt.

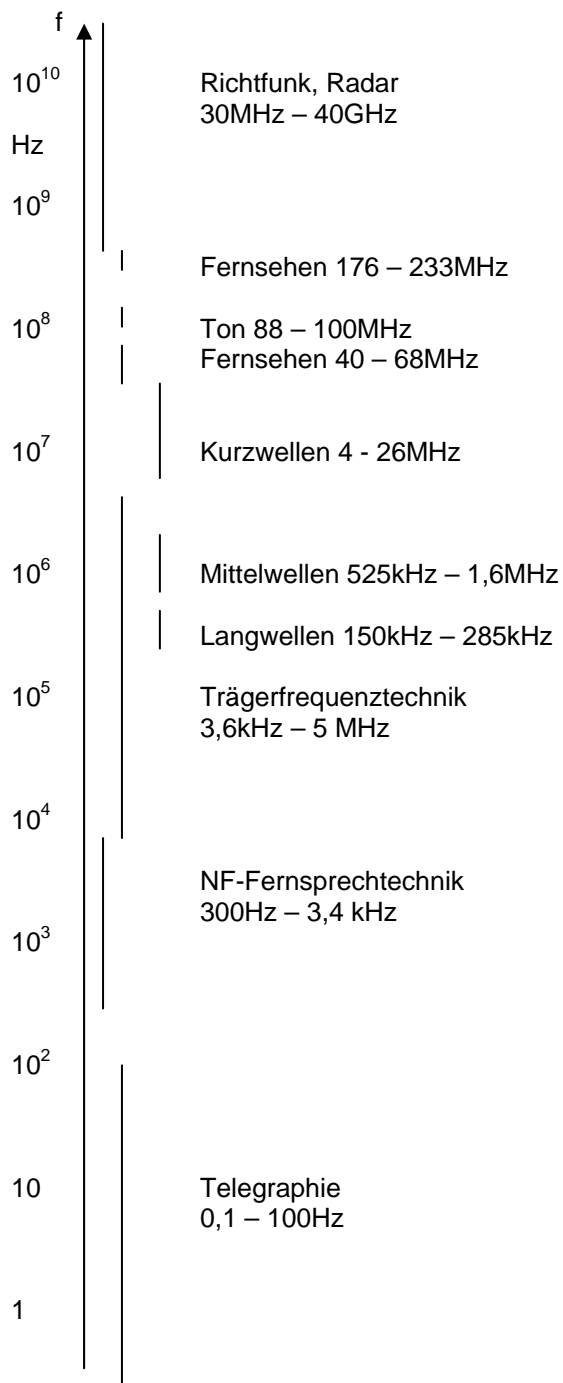
3.4 Frequenzabhängige Bauteile

/1/ 329; /2/ 211,238; /7/ 252; /5/ 107

- allgemeine Bedeutung der Frequenzabhängigkeit /1/ 303

Die komplexen Widerstände von Kondensator und Spule sind, anders wie der ohmsche Widerstand, von der Frequenz abhängig. Damit wird es möglich, Schaltungen zu realisieren, die sich für unterschiedliche Frequenzen unterschiedlich verhalten. Nur dadurch ist es möglich Funkempfänger/Sender zu bauen. Dabei werden diese analogen Bauteile immer mehr durch die digitale Nachbildung dieser Eigenschaften verdrängt.

Die Frequenzbereiche von Sinusschwingungen sind:



Durchlaß von Wechselstromschwingungen beim Kondensator

Ein an Wechselspannung liegender Kondensator wird häufig geladen und wieder entladen.

Bei eingepprägter sinusförmiger Spannung

1. Viertelperiode: Laden - Spannung steigt auf \hat{u}
2. Viertelperiode: Entladen - Spannung sinkt auf 0
3. Viertelperiode: umgekehrtes Laden - Spannung sinkt auf $-\hat{u}$
4. Viertelperiode: umgekehrtes Entladen - Spannung steigt auf 0

Schwingbewegungen der Elektronen im Leiter bei Wechselstrom

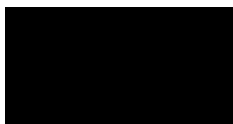
Die Elektronen eines Wechselstroms führen im Leiter Schwingbewegungen aus. Sie schwingen auf einem Kondensatorbelag herauf und von dem anderen Kondensatorbelag herunter.

Die Wechselstromschwingung setzt sich über den Kondensator hinweg fort.

Man sagt, ein Kondensator läßt Wechselstrom durch, d.h. aber nicht, daß die Elektronen durch das Dielektrikum fließen. Die Ladungen der beiden Beläge sind über das elektrische Feld miteinander gekoppelt. Dadurch wird die Wechselstromschwingung weitergeleitet.

Kapazitiver Blindwiderstand

Der Kondensator setzt der Wechselstromschwingung einen Widerstand entgegen. Je größer die Wechselstromfrequenz und je größer die Kondensatorkapazität, desto geringer ist dieser Widerstand.

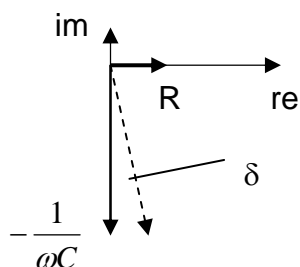


$$X_c = \frac{1}{\omega * C}$$

Der Widerstand des Kondensators wird Blindwiderstand genannt, da in ihm keine elektrische Leistung in Wärmeleistung umgesetzt wird.

Verlustfaktor und Verlustwinkel

Es gibt keine vollkommen verlustfreie, sondern nur verlustarme Kondensatoren. Die Verluste werden durch einen Verlustwiderstand R erfaßt. der zur verlustfreien Kapazität C in Reihe liegt.



Zeigerdiagramm eines verlustbehafteten Kondensators

Erläuterung: Die Phasenverschiebung zwischen U und I ist kleiner als -90° . Dem Kondensator fehlt zur Vollkommenheit der Winkel δ : Dieser Winkel wird Verlustwinkel genannt. Der Verlustfaktor ist der Tangens des Verlustwinkels.

$$\tan \delta = \frac{R}{X_C}$$

Bemerkung: Je kleiner der $\tan \delta$ eines Kondensators ist, desto verlustärmer, also desto besser ist der Kondensator.

Sperrn von Wechselstromschwingungen

Eine an Wechselspannung liegende Spule hat immer beim Nulldurchgang des Stromes die höchste Stromänderung und damit die größte Spannung. Dieser Sachverhalt nimmt auch mit steigender Frequenz zu. Sie setzt damit der Schwingung einen mit der Frequenz zunehmenden Widerstand entgegen.

Die Wechselstromschwingung setzt sich über die Spule nicht fort.

Man sagt, eine Spule sperrt Wechselstrom, d.h. aber nicht, daß die Spannung ebenfalls nicht übertragen wird.

Induktiver Blindwiderstand

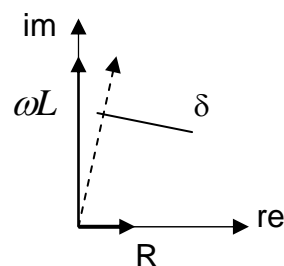
Die Spule setzt der Wechselstromschwingung einen Widerstand entgegen. Je größer die Wechselstromfrequenz und je größer die Spuleninduktivität, desto größer ist dieser Widerstand.

$$X_L = \omega L$$

Der Widerstand der Spule wird Blindwiderstand genannt, da in ihm keine elektrische Leistung in Wärmeleistung umgesetzt wird.

Verlustfaktor und Verlustwinkel

Es gibt keine vollkommen verlustfreie, sondern nur verlustarme Spulen. Die Verluste werden durch einen Verlustwiderstand R erfaßt. der zur verlustfreien Induktivität L in Reihe liegt.



Zeigerdiagramm einer verlustbehafteten Spule

Erläuterung: Die Phasenverschiebung zwischen U und I ist kleiner als 90°. Der Spule fehlt zur Vollkommenheit der Winkel δ : Dieser Winkel wird Verlustwinkel genannt. Der Verlustfaktor ist der Tangens des Verlustwinkels.

$$\tan \delta = \frac{R}{X_L}$$

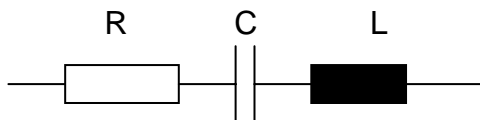
Bemerkung: Je kleiner der $\tan \delta$ einer Spule ist, desto verlustärmer, also desto besser ist die Spule.

Technisch wird dieser Effekt vor allem in kombinierten Schaltungen mit Kondensatoren, Spulen und Widerständen (sogenannten Schwingkreisen) ausgenutzt. So läßt sich z.B. bei der Klangbearbeitung durch eine Reihenschaltung aus je einem Widerstand, einer Spule und einem Kondensator ein bestimmtes Frequenzband hervorheben.

- der Kondensator und die Spule als komplexer Widerstand
/2/ 219; /3/ 216; /2/ 215; /3/ 212

In gemischten Schaltungen, in denen sich Spulen, Kondensatoren und Widerstände befinden, kann mit Hilfe der Rechnung mit komplexen Zahlen (komplexen Widerständen) die Widerstandsberechnung durchgeführt werden.

Z.B. bei der gegebenen Schaltung:



ergibt sich der Gesamtwiderstand als Addition der Widerstände:

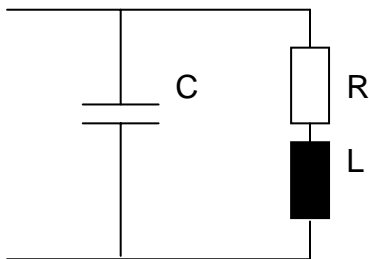
$$\Re_{ges} = R + \Re_C + \Re_L = R + \frac{1}{j\omega C} + j\omega L = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

Der Gesamtwiderstand wird minimal (rein reell), wenn für den Imaginärteil gilt:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad \text{oder} \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad \text{ist. Bei dieser Frequenz tritt keine Phasenverschiebung}$$

auf und der Strom wird nur durch R begrenzt.

Z.B. bei der gegebenen Schaltung:



ergibt sich der Gesamtwiderstand als Reihenschaltung von R und L, die zu dem Kondensator parallel geschaltet ist:

$$\mathfrak{R}_{ges} = \frac{(R + j\omega L) \frac{1}{j\omega C}}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{(R + j\omega L)}{1 - \omega^2 LC + j\omega RC} = \frac{R + j\omega(L - R^2 C - \omega^2 L^2 C)}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega RC)^2}$$

An der Gleichung ist zu erkennen, daß der Zähler für ein bestimmtes ω minimal und rein reell wird. Die Schaltung hat also für diese Frequenz den geringsten Widerstand. Ebenso kann der Nenner minimal oder 0 werden. Dort hat die Schaltung dann den größten Widerstand. Wird der Nenner für eine bestimmte Frequenz 0, so wird diese Frequenz nicht übertragen.

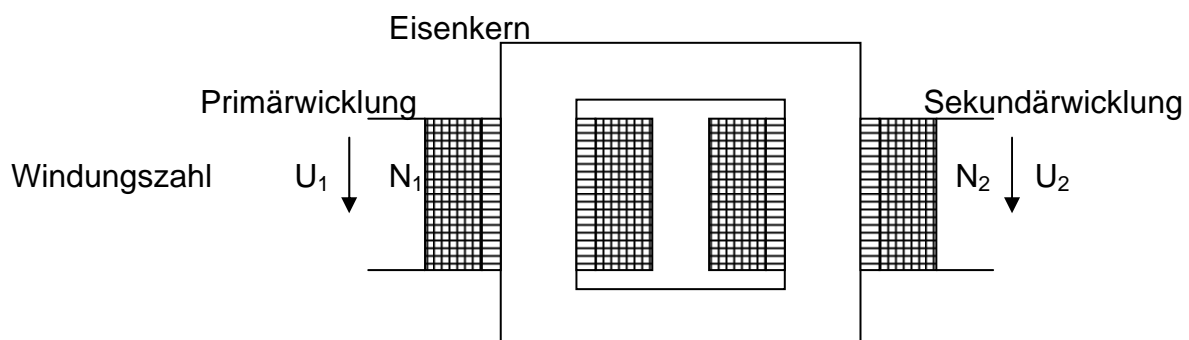
Dabei kann immer die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung als:

$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{\text{Im}[\mathfrak{R}]}{\text{Re}[\mathfrak{R}]}$$

beschrieben werden.

- der Transformator /1/ 371; /3/ 304; /6/ 189; /11/111

Bei einem Transformator wird die elektromagnetische Kopplung ausgenutzt. In einer Primärwicklung wird, entsprechend einem sinusförmigen Strom, ein sich wechselndes magnetisches Feld erzeugt. Dieses Feld erzeugt in einer Sekundärwicklung wieder eine Spannung.



Entsprechend den Gleichungen, die wir schon bei der Berechnung der Induktivität kennengelernt haben gilt: $u_2(t) = N_2 \frac{d\phi}{dt}$, wobei der magnetische Fluß durch die

Primärwicklung nach folgender Gleichung erzeugt wird $\phi(t) = \frac{N_1 \mu A}{l} i_1(t)$, und der Zusammenhang zwischen Strom und Spannung an einer Spule durch die Gleichung:

$$u_1(t) = N_1^2 \frac{\mu A}{l} \frac{di_1(t)}{dt} \text{ beschrieben wird.}$$

Setzt man die Gleichungen geeignet in einander ein, so erhält man:

$$\frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{N_1}{N_2}. \text{ Das Verhältnis der Spannungen entspricht dem der Windungszahlen.}$$

Damit wird es möglich, Spannungen durch die Wahl von Windungszahlen zu transformieren.

Für die Ströme gilt: $\frac{i_1(t)}{i_2(t)} = \frac{N_2}{N_1}$. Das Verhältnis der Ströme entspricht dem Kehrwert des Verhältnisses der Windungszahlen.

Damit wird es möglich, z.B. für die Energieübertragung kleine Ströme und hohe Spannungen zu wählen und beim Verbraucher wieder mit kleinen Spannungen zu arbeiten.

Ist am Transformator auf der Sekundärseite ein Widerstand angeschlossen, wird dieser auf die Primärseite nach folgender Gleichung abgebildet:

$$R = \frac{u_2(t)}{i_2(t)} = \frac{u_1(t) \frac{N_2}{N_1}}{i_1(t) \frac{N_1}{N_2}} = \frac{N_2^2}{N_1^2} \frac{u_1(t)}{i_1(t)}, \text{ oder } \frac{u_1(t)}{i_1(t)} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R. \text{ Das bedeutet, daß der}$$

Widerstand der Sekundärseite mit dem Quadrat des Windungszahlverhältnisses auf die Primärseite abgebildet wird. Diesen Vorgang nennt man Impedanzwandlung.

Netztransformator :

Kenngößen:

Eingangsspannung 230 V

Ausgangsspannung 8 V

Kosten: ca. 20 DM

Herstellungsgebiet: SO-Asien

Einbaugröße: 50 x 51 x 64 mm

Drahtdm.: Primär > Sekundär

abhängig von Stromstärke/Stromdichte

Windungszahl: Verhältnis 230/8
 d.h. primär = 28,75 * sekundär
 max. zulässiger Ausgangsstrom 3 A

3.5 Leistung und Energie

/1/ 329; /2/ 218; /3/ 230,298; /5/ 97; /7/ 331

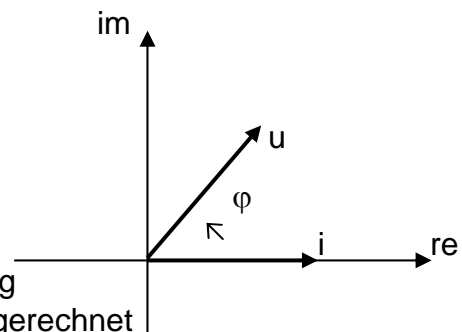
- Blind-, Schein- u. Wirkleistung /6/ 193; /10/ 86

Wie in der Gleichstromtechnik, kann in der Wechselstromtechnik (hier jedoch mittels komplexer Rechnung) die Leistung eines Verbrauchers berechnet werden. Auch hier gilt:

$$P = u(t)i(t) = \hat{u} \sin(\omega t + \varphi) \hat{i} \sin \omega t = P_W + jP_B$$

$$P_W = I_{eff}^2 \operatorname{Re} \mathfrak{R}$$

$$P_B = I_{eff}^2 \operatorname{Im} \mathfrak{R}$$

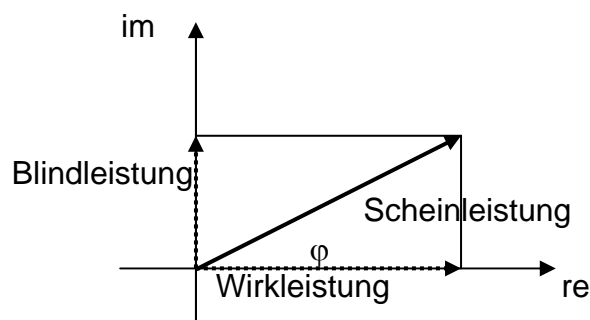


Für die Berechnung der Leistung aus der Spannung muß mit dem konjugiertkomplexen Widerstand \mathfrak{R}^* gerechnet werden. Dies liegt in der Eigenart der komplexen Rechnung begründet. Damit gilt:

$$P = \frac{U_{eff}^2}{\mathfrak{R}^*} = \frac{U_{eff}^2 \mathfrak{R}}{|\mathfrak{R}|^2} = U_{eff}^2 \left(\frac{\operatorname{Re} \mathfrak{R}}{|\mathfrak{R}|^2} + j \frac{\operatorname{Im} \mathfrak{R}}{|\mathfrak{R}|^2} \right)$$

Damit ergibt sich eine komplexe Scheinleistung mit einem Realanteil und einem Imaginäranteil. In der Literatur wird oft die Scheinleistung mit S, die Blindleistung (Imaginärteil) mit B und die Wirkleistung (Realteil) mit P bezeichnet.

- Die Wirkleistung, ist die Leistung, die im Verbraucher genutzt wird.
- Die Blindleistung ist eine Leistung, die zwischen Verbraucher und E-Werk hin und her schwingt und keine Verbraucherleistung erzeugt.
- Die Scheinleistung ist die Addition von Blind- und Wirkleistung.



Da die schwingende Blindleistung auch die Leitungen durch Strom belastet, berechnen die Energieversorger die Kosten auf Basis der Scheinleistung. In realen Anlagen der Industrie ist $\varphi > 0$. Das bedeutet, daß die Verbraucher einen induktiven Anteil besitzen. Um die Energiekosten zu minimieren wird dann häufig die Blindleistung durch das Zuschalten einer kapazitiven Last reduziert.

Zur Berechnung der Wirkleistung wird häufig die Gleichung: $P = U_{eff} I_{eff} \cos \varphi$ herangezogen.

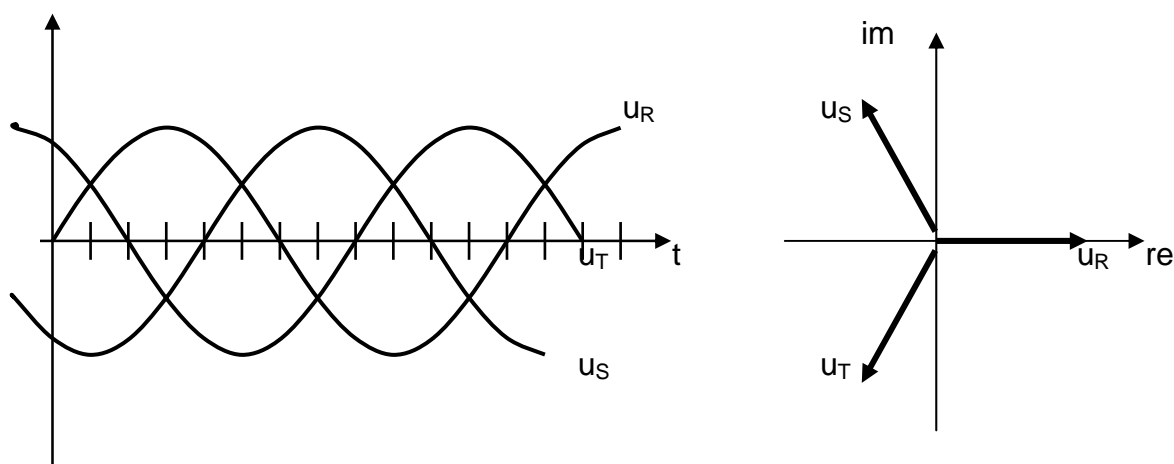
3.6 Drehstrom

/1/ 436; /2/ 395; /3/ 239,274; /6/ 185; /7/ 346; /10/ 193

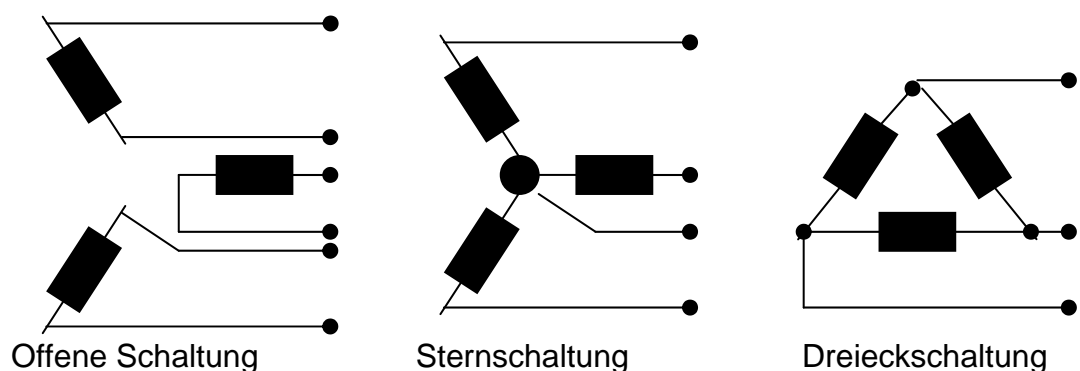
Wie schon in 3.1 erwähnt liegen beim Drehstrom 3 Spannungen mit jeweils 120° Phasenverschiebung vor. Betrachten wir die Summe der 3 Spannungen ergibt sich:

$$U_{\text{Summe}} = \hat{u}(\sin(\omega t) + \sin(\omega t + 120^\circ) + \sin(\omega t + 240^\circ)) = 0$$

wenn die Amplituden der Einzelspannungen gleich sind.



Für die 3 Spannungserzeugenden Wicklungen des Generators gibt es 3 verschiedene Beschaltungsarten:



Bei der offenen Schaltung steht ein Sechsheiternetz zur Verfügung. Dieses hat nur theoretische Bedeutung.

Die Dreieckschaltung ergibt ein Dreileiternetz. Dieses wird vor allem für den Energietransport eingesetzt.

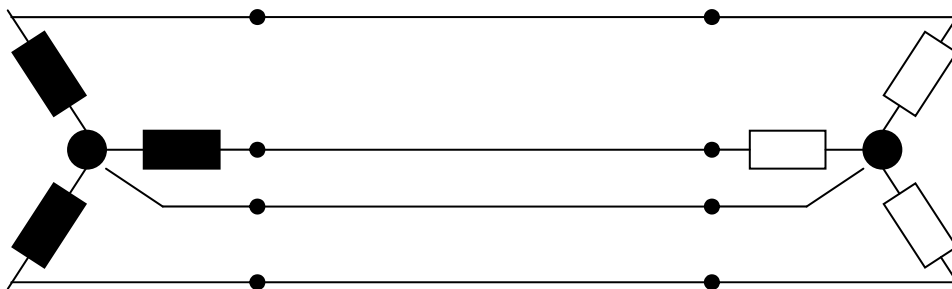
Die Sternschaltung ist ein Vierleiternetz. Dabei ist jeweils ein Ende der Wicklungen zu einem Sternpunkt zusammengefaßt. Das bedeutet, daß bei einer, für alle drei Phasen gleichen Last, auf der gemeinsamen Rückleitung kein Strom fließt. Dieser

Rückleiter hat deshalb den Namen: Nullleiter. Sind die Lasten ungleich oder wird mit nur einer Phase gearbeitet, so fließt natürlich auf dieser Leitung ein Strom.

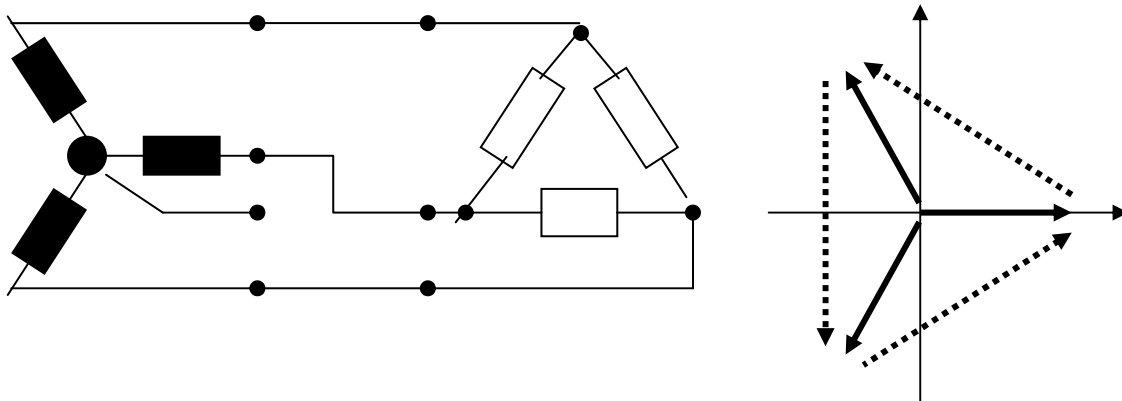
In einem Vierleiternetz, das für den Mittel- und Schwachstrombereich gängig ist, kann der (die) Verbraucher in 2 Arten beschaltet werden:

Sternschaltung des Verbrauchers

Bei dieser Beschaltung liegt zwischen den einzelnen Phasen und dem Nullleiter die Verbraucherspannung. Die bei uns übliche Spannung ist 230 V.



Eine andere Möglichkeit der Beschaltung mit dem Verbraucher ist die Dreieckschaltung. Dabei liegen die Verbraucher immer zwischen 2 Phasen, also zwischen 2 Potentialen, die durch um 120° phasenverschobene Sinusschwingungen gebildet werden. Dadurch entsteht eine um den Faktor $\sqrt{3}$ größere Spannung am Verbraucher. Die Leistungsaufnahme in Dreieckschaltung ist dann um den Faktor 3 größer als in der Sternschaltung.



4. Elektronik, Halbleitertechnik

/1/ 228,237; /3/ 334

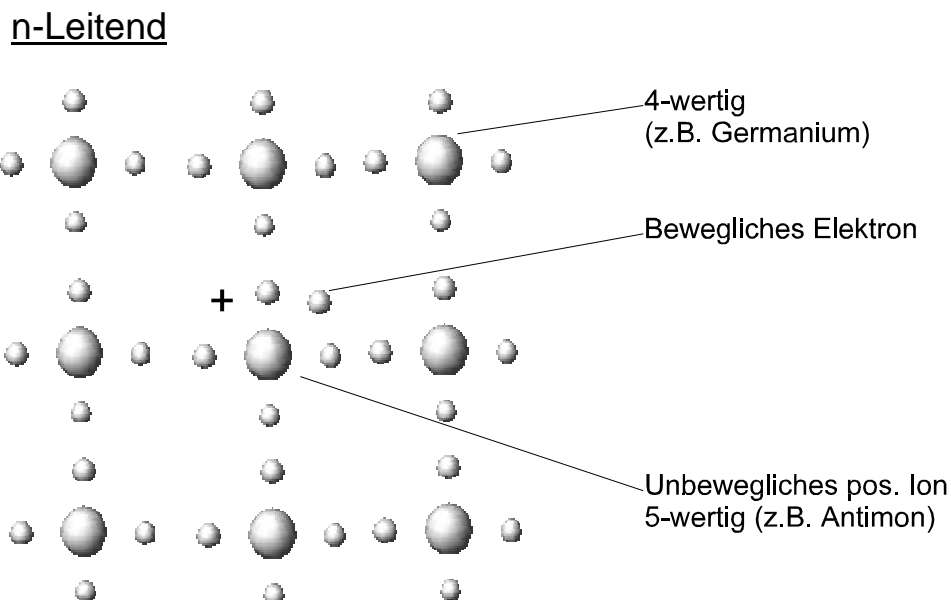
Halbleiter haben einen spezifischen Widerstand, der zwischen dem der Metalle und Isolatoren liegt. Grundlegend hierfür ist das Bändermodell. Typische, in der Halbleitertechnik verwendete Stoffe sind:

- Silizium,
- Galliumarsenid und
- Germanium.

Der spezifische Widerstand dieser Halbleiter wird durch gezielte Beimengung (Dotieren) bestimmter Stoffe verändert.

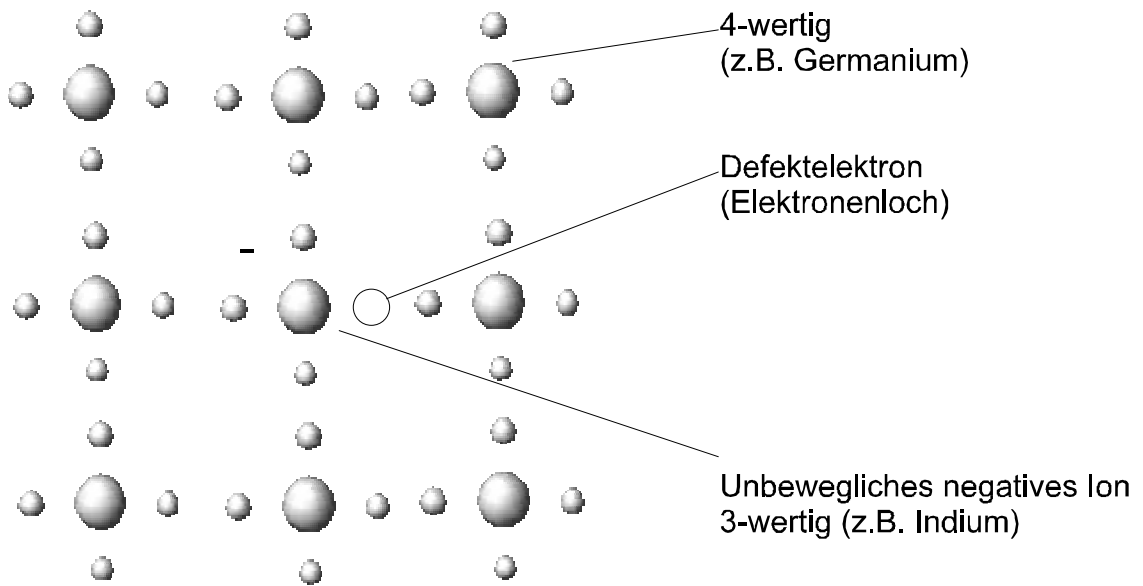
Werkstoffe	spezifischer elektrischer Widerstand ($\Omega \cdot \text{cm}$)
Metalle	$10^{-6} \dots 10^{-4}$
Isolatoren	$> 10^{10}$
Halbleiter	$10^2 \dots 10^7$

Stromleitung in Halbleitern



Das zusätzliche Elektron (siehe Skizze) ist zwar an das Antimonatom gebunden, kann jedoch durch thermische Energiezufuhr leichter gelöst werden. Ersetzt man viele Germaniumatome durch Antimonatome wird aus dem Germanium bei Raumtemperatur ein relativ guter Leiter.

p- Leitend

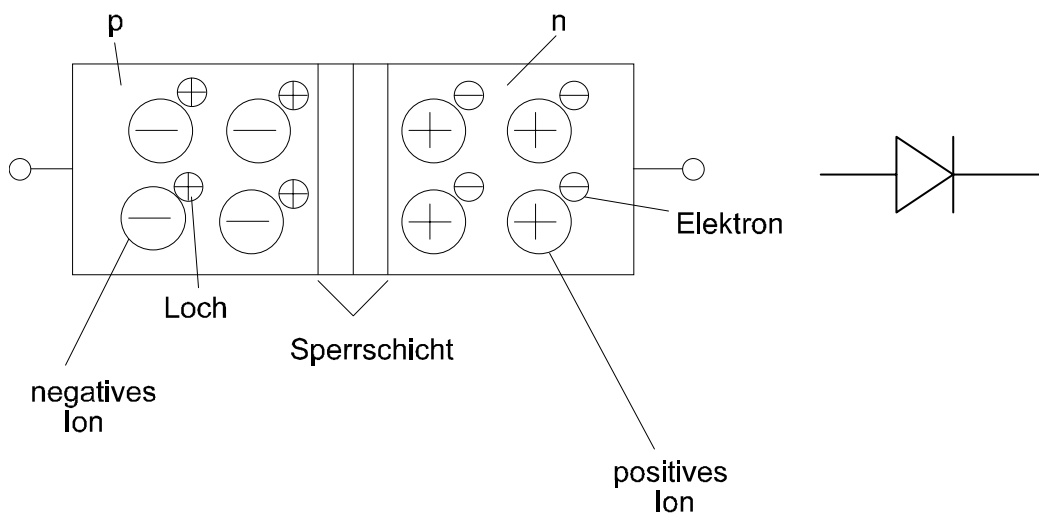


Das zur kovalenten Bindung fehlende Elektron kann aus den benachbarten Germanium-Germanium-Bindungen besorgt werden. Zurück bleibt dann ein positives Germaniumatom und ein negatives Indiumatom. Die Bindung des hinzugekommenen Elektrons des Indiumatoms ist schwächer als jene an das Germaniumatom. Das Elektron kann folglich bei Energiezufuhr springen. Zurück bleibt wieder ein negatives Indiumatom....usw. (Lochsprung). Beide Leitungsformen bezeichnet man als Störstellenleitung.

4.1 Dioden

/1/ 243; /3/ 336; /6/ 310

Durch Zusammenfügen der beiden unterschiedlichen Leiter entsteht ein sog. p-n-Übergang



Jeder der beiden Bereiche ist für sich selber elektrisch neutral. Zwischen den

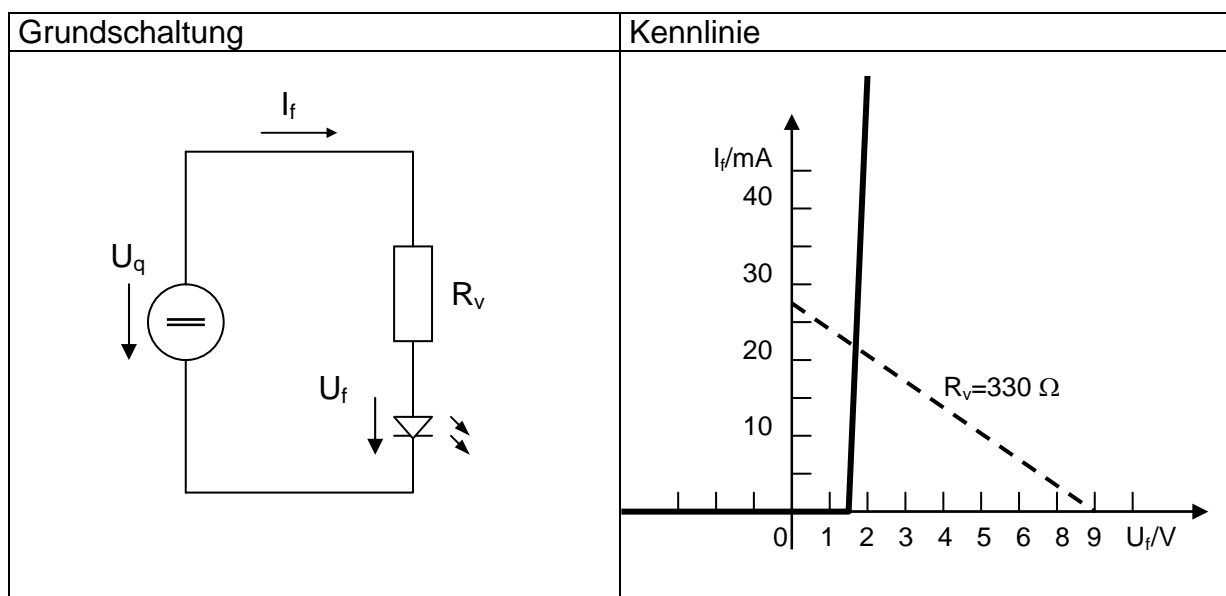
Elektronen im n-Bereich und denen im p-Bereich besteht ein großer Konzentrationsunterschied. Der Übergang als solches kann in seiner Wirkungsweise wie ein Ventil betrachtet werden.

- a) Polung 'Plus an p-Zone' ; der p-n-Übergang ist in Durchlaßrichtung geschaltet (Diode hat einen sehr niedrigen Widerstand).
- b) Polung 'Plus an n-Zone' ; der p-n-Übergang ist in Sperrichtung geschaltet (Diode weist einen sehr hohen Widerstand auf).

LED: Licht-emittierende-Diode

Funktionsweise:

Eine **LED** ist eine **pn-Diode**, die elektrischen Strom in Licht umwandelt. Dabei handelt es sich aber um kaltes Licht, nicht wie bei einer Glühlampe über thermische Anregung. Die Elektronen des n-dotierten Halbleiters werden in p-dotiertes Gebiet injiziert. Dort findet eine Rekombination der (negativen) Elektronen mit den (positiven) Löchern statt, dadurch wird Energie in Form von Lichtquanten freigesetzt. **Leuchtdioden** haben sehr kurze Ansprechzeiten (Nanosekundenbereich) und eine geringe Stromänderung wird bereits in Lichtschwankung umgesetzt. Der Wellenbereich des abgestrahlten Lichtes liegt im roten, gelben, grünen oder blauen Spektrum. Die Farbe ist nicht von einer Diodenfarbe (Einfärbung) sondern vom Energiesprung bei der Rekombination abhängig. Die Färbung der Diode unterstützt lediglich die Farbwirkung. **LEDs** haben eine Lebensdauer von 10^6 Stunden.



Anwendungsgebiete:

Leuchtdioden werden z.B. als 7-Segment-Display zur digitalen Anzeige von Uhrzeit, Temperatur usw. eingesetzt.

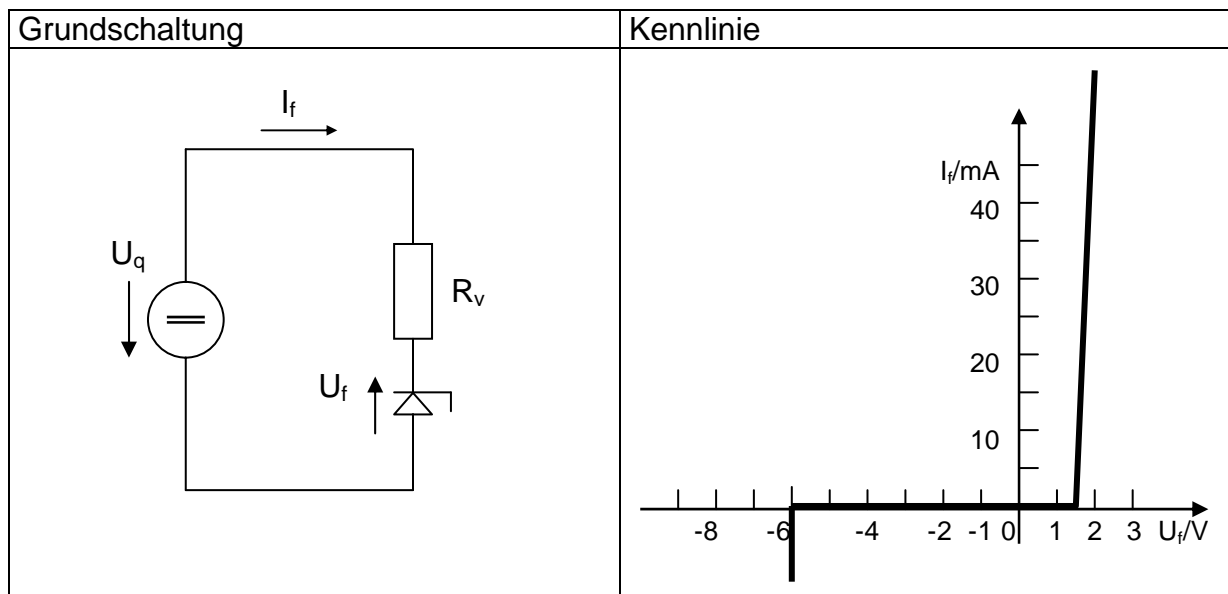
Z-Dioden: Zener-Dioden

Funktionsweise:

Z-Dioden sind hochdotierte Silizium-Halbleiterdioden. Sie werden in Sperrichtung bei einer konstruktionsbedingten Spannung U_z niederohmig. Wird bei einer **Z-Diode** eine Spannung in Sperrichtung angelegt, entsteht am **pn**-Übergang der Diode ein elektrisches Feld. Ab einer bestimmten Sperrspannung U_z ist das elektrische Feld groß genug, um Elektronen aus ihren Bindungen zu lösen und einen Stromfluß zu ermöglichen. Man spricht hierbei vom *Zener effekt*.

Die entstandenen freien Elektronen werden durch das elektrische Feld so stark beschleunigt, daß sie andere Elektronen beim Zusammenstoß aus ihren Bindungen reißen. Die Zahl der freien Ladungsträger steigt sprunghaft an. Dies nennt man den *Lawineneffekt*. Da sich beide Effekte überlagern, nennt man diese Vorgänge auch den *Zenerdurchbruch der Sperrschicht*. Die plötzlich hohe Leitfähigkeit der Sperrschicht kann zu einem sehr hohen Strom in Sperrichtung führen. Wird dieser Strom nicht begrenzt, so wird die **Z-Diode** zerstört.

Z-Dioden sind in ihren Eigenschaften temperaturabhängig. Je höher die Temperatur, desto höher ist die benötigte Durchbruchsspannung. Durch verschieden hohe Dotierungen kann man Z-Dioden mit 2V bis 600V Durchbruchsspannung herstellen.



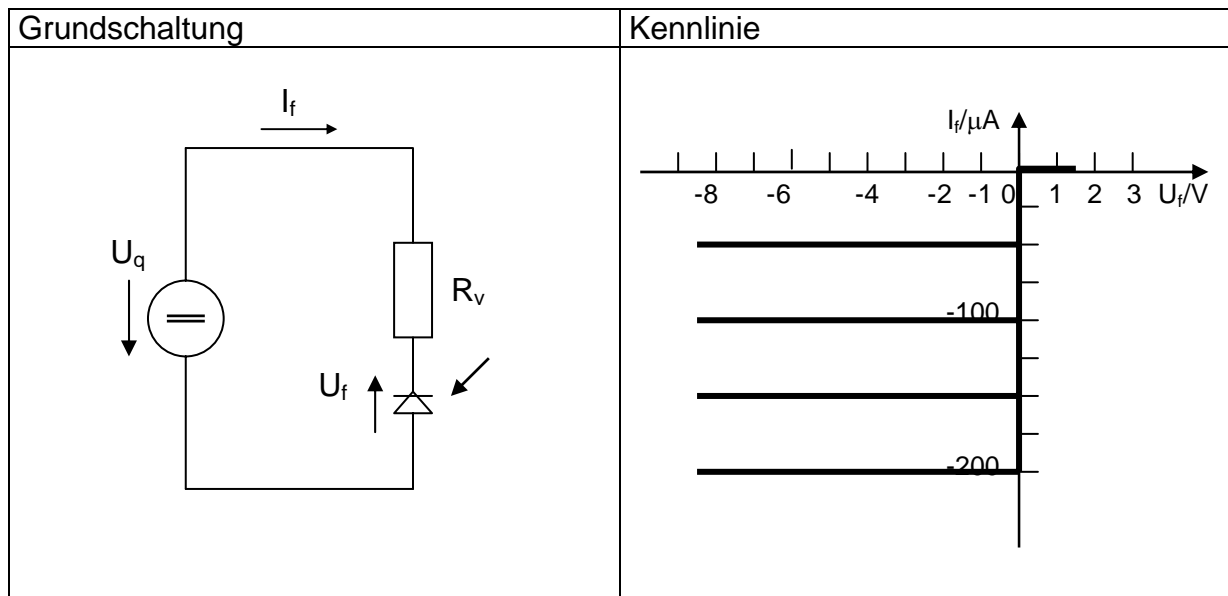
Anwendungen:

Z-Dioden eignen sich hervorragend zur Spannungsstabilisierung. Sie werden in fast allen stabilisierten Netzgeräten verwendet.

Fotodioden

Funktionsweise:

Fotodioden setzen Licht (elektromagnetische Wellenstrahlen verschiedener Wellenlängen) über eine Widerstandsänderung der Sperrschicht in elektrischen Strom um. Bei Lichteinfall werden Ladungsträger erzeugt und vom entgegengesetzten Pol angezogen. Der Sperrstrom ist proportional zum Lichteinfall.



Anwendungen:

Photodioden finden ihrem Einsatz in Lichtschranken, Bildwandler und bei der Demodulation von Lichtsignalen.

Kapazitätsdioden

Funktionsweise:

Wird eine normale Halbleiterdiode in Sperrichtung betrieben, so stellt die Sperrschicht(=Raumladungszone) eine Kapazität dar. Die Sperrschicht enthält fest eingebaute, also unbewegliche Ladungsträger:

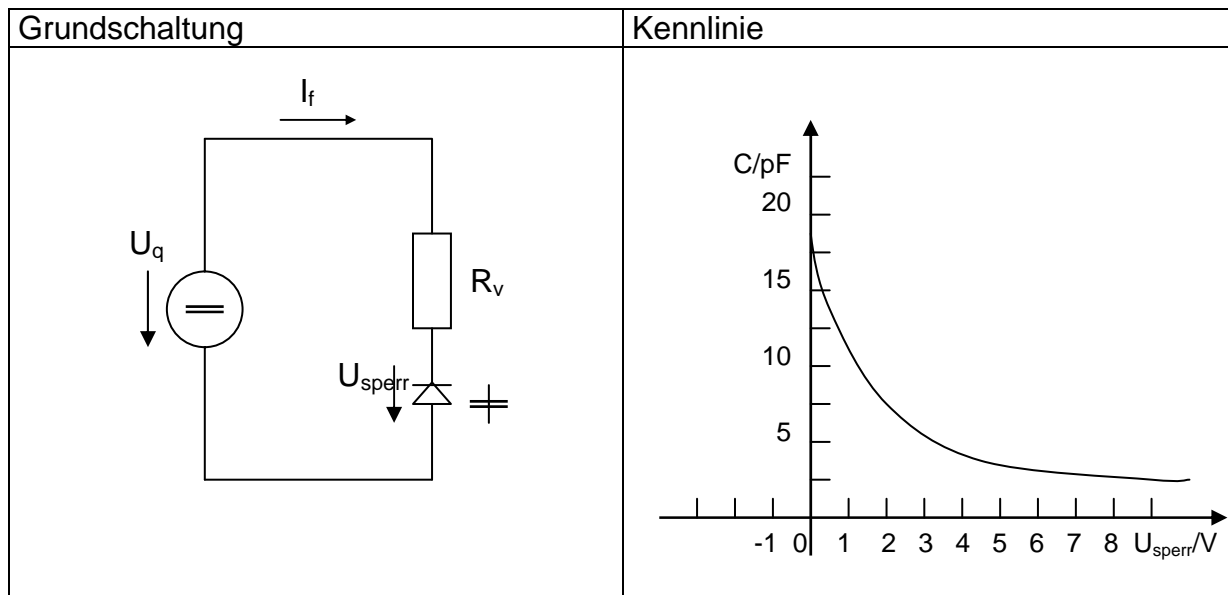
- die Donatoratome sind positiven Ladungsträger,
- die Akzeptoren sind negativen Ladungsträger.

Je größer die in Sperrichtung angelegte Spannung ist,

- ↳ desto größer wird die Raumladungszone,
- ↳ desto größer ist der mittlere Abstand der Ladungsträger,
- ↳ desto kleiner ist die Kapazität.

┌ Die Kapazität der Diode ist spannungsabhängig

Zwischen der Sperrschichtkapazität und der Sperrspannung besteht ein nichtlinearer Zusammenhang.



Anwendungsgebiete:

Abstimmung von Schwingkreisen in Radio- und Fernsehgeräten.

4.2 Transistoren

/1/ 253; /3/ 336; /6/ 317

Bipolare-Transistoren

Bipolare Transistoren können als 2 in Reihe geschaltete Dioden betrachtet werden, die den mittleren Bereich gemeinsam haben. Dabei werden, je nach Aufbau der Dotierung, npn- und pnp-Transistoren unterschieden. In der Praxis werden am häufigsten npn-Transistoren eingesetzt. Bei pnp-Transistoren werden lediglich die n- und p-Schichten und die Vorzeichen der Ströme und Spannungen vertauscht. Die beiden Enden der „Reihenschaltung“ sind formal gleichberechtigt. Durch den funktionalen Aufbau werden Kollektor C und Emitter E unterschieden. Der dazwischen liegende Bereich wird Basis genannt.

Funktionsweise:

Zwischen Emitter und Basis, sowie zwischen Basis und Kollektor liegen pn-Übergänge. Der Übergang zwischen Emitter und Basis in Durchlaßrichtung (geringer Widerstand) und der Übergang zwischen Kollektor und Basis in Sperrichtung (hoher Widerstand) geschaltet. Die Elektronen (mikroskopische Betrachtung) fließen vom Emitter zur Basis. Durch die dadurch eingebrachten Elektronen wird die Sperrschicht leitend und durch den Aufbau teilt sich der Strom in einen geringen Basisstrom und einen hohen Kollektorstrom (fast so hoch wie Emitterstrom) auf.

Funktionsprinzipien der Transistoren

Typ	Bipolare Transistoren		Unipolare Transistoren					
	nnp-Transistoren	pnp-Transistoren	Sperrschicht-FET	Insulated Gate FET (MOSFET)				
			n-Kanal-FET	p-Kanal-FET	Verarmungstyp		Anreicherungstyp	
			n-Kanal-MOSFET	p-Kanal-MOSFET	n-Kanal-MOSFET	p-Kanal-MOSFET	n-Kanal-MOSFET	p-Kanal-MOSFET
Prinzipieller Aufbau								
Schaltzeichen								
Kennlinie								
	U_{CE} positiv	U_{CE} negativ	U_{DS} positiv	U_{DS} negativ	U_{DS} positiv	U_{DS} negativ	U_{DS} positiv	U_{DS} negativ
Eigenschaften	Stromgesteuert		spannungsgesteuert selbstleitend bei $U_{GS}=0$		spannungsgesteuert selbstleitend bei $U_{GS}=0$		spannungsgesteuert selbstsperrend bei $U_{GS}=0$	

Der Strom vom Kollektor zum Emiteer ist in gewissen Bereichen nur vom Basisstrom und nicht von der Kollektor-Emiteer-Spannung abhängig. Verschiedene Beschaltungsprinzipien ermöglichen es, den bipolaren Transistor als Stromverstärker, Spannungsverstärker oder als Imedanzwandler zu verwenden.

Anwendungsgebiete:

Verstärkung analoger und digitaler Signale

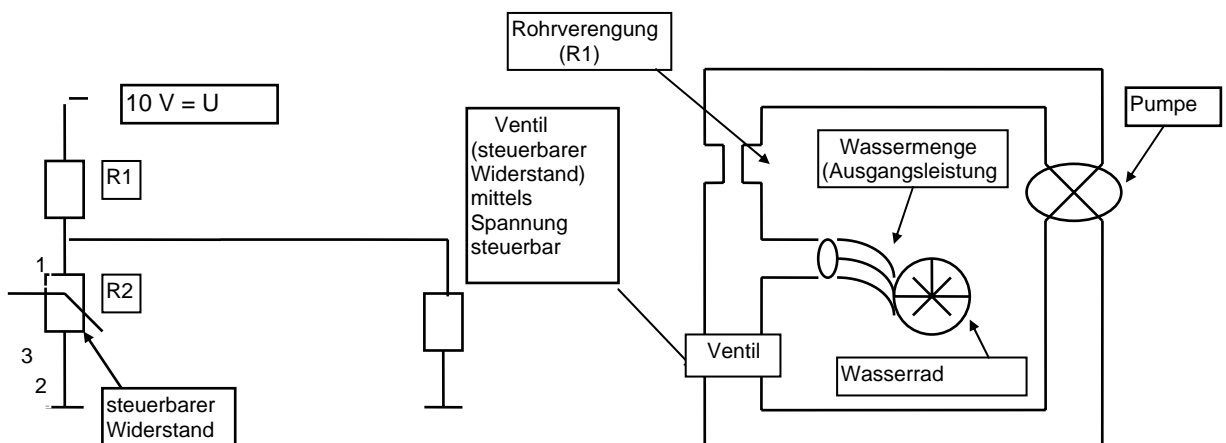
Arbeitsbereiche				
Strom in A	Spannung in V	Leistung in W	Preis in DM/Stk	Bemerkungen
0,2	30	6	0,2	
6	800	4800	2,45	
15	100	1500	4,25	
20	25	500	69,00	

Unipolare Transistoren

Der unipolare Transistor kann als, durch eine Spannung steuerbarer Widerstand betrachtet werden. Über die Spannung am Gate G wird die Sperrschicht dahingehend verändert, daß der leitende Bereich zwischen D und S abgeschnürt oder größer wird. Je nach Ausführung können die Transistoren im Ruhezustand leitend oder sperrend sein.

Anwendungsbeispiel

Analogie: Wasserkreislauf



Spannung ist proportional zum Widerstand

Die Menge des Wassers auf das Wasserrad ist abhängig von der Ventilstellung

Strecke (1) - (2): Größe des Widerstandes
 (3) Ansteuerung des Widerstandes mittels einer Spannung

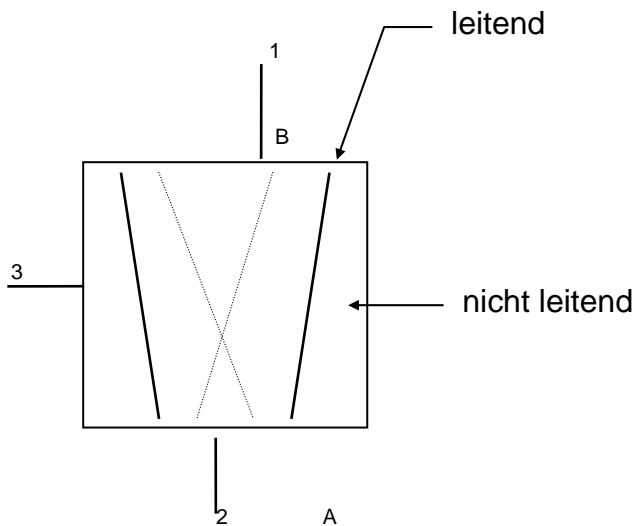
Der Transistor (R2) ist ein veränderbarer Widerstand, der durch die Spannung gesteuert wird. Der Widerstand R1 ist ein unveränderbarer Widerstand.

⇒ bedingt durch die Spannungsteilerregel ergibt sich

$$\frac{U_2}{R_2} = \frac{U_G}{R_1 + R_2} \rightarrow U_2 = \frac{U_G}{R_1 + R_2} * R_2$$

⇒ damit wird das Ausgangssignal durch den Widerstand vom Transistor (R2) und der Betriebsspannung U_A beeinflusst.

Satz: Ein unipolarer Transistor ist nichts anderes, als ein veränderbarer Widerstand, der mittels einer Spannung variiert werden kann.

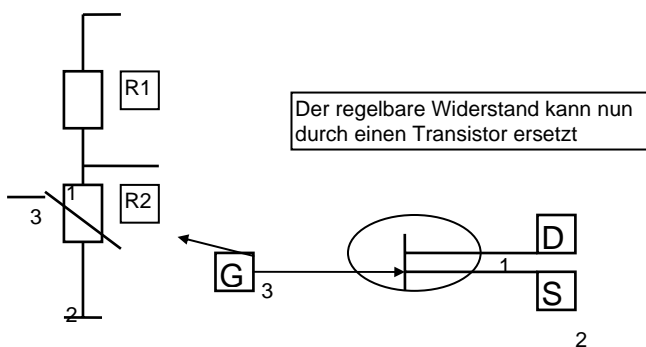


A = Keine Spannung an (3),
 dadurch kleiner Widerstand
 ⇒ Stromflußmöglichkeit
 ⇒ Ausgangssignal klein

B = Spannung an (3),
 dadurch hoher Widerstand
 ⇒ kein Stromfluß
 ⇒ Ausgangssignal groß

⇒ Steuerung des Stromflusses durch eine Sperrschicht

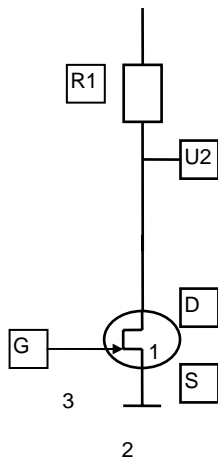
Betrachtung des veränderbaren Widerstandes R2 (Transistor) am Beispiel eines J-FET (Junction Feldeffekttransistor)



G = Gate (Öffnung)

D = Drain (Abfluß)

S = Source (Quelle)



(Analogie zum Bsp. mit Wasserkreislauf)

(1) und (2) regulieren die Größe des Widerstandes und sind abhängig von (3)

(3) Ansteuerung des Transistors mittels Spannung

Unterscheidung der Transistoren

1. J-Fet-Transistoren

N-Kanal-J-Fet

Benötigt: - positive Betriebsspannung U_G
- negative Abschnürspannung U_{AS}

P-Kanal-J-Fet

- negative Betriebsspannung U_G
- positive Abschnürspannung U_{AS}

Anwendung der J-Fet-Transistoren

Tontechnik: Da die J-Fet-Transistoren geringere Eigenrauschleistungen besitzen, ist die Verstärkung rauschärmer. (Rauschen ist ein Nachteil der Halbleitertechnik - verursacht durch Atombewegungen)

2. Mos-Fet-Transistoren

Unterschied zum J-Fet: Beim Mos-Fet erfolgt die Ansteuerung über eine Isolierschicht (meist eine Metalloxidschicht).

N-Kanal (Anreicherungs- und Verarmungstyp)

- wird mit einer positiven Spannung angesteuert

P-Kanal (Anreicherungs- und Verarmungstyp)

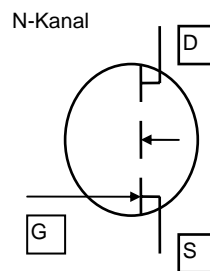
- wird mit einer negativen Spannung angesteuert

1. Anreicherungstyp

Wenn keine Spannung anliegt, fließt kein Strom (Nichtleiter).

Es müssen zuerst Löcher bzw. Elektronen durch eine positive Spannung zwischen Drain und Source angesammelt werden, damit Strom fließen kann.

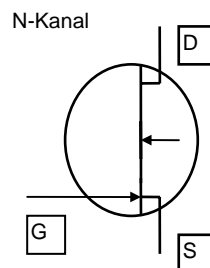
Anwendung: Wird als Schalter verwendet.
Vorteil gegenüber Relais: preisgünstiger.



2. Verarmungstyp

Wenn keine Spannung anliegt, fließt bereits Strom. Es liegen also bereits Elektronen zwischen Drain und Source und sorgen dafür, daß ein Strom fließt.

Anwendung: typischer Verstärker



⇒ Generelle Anwendung von Mos-Fets:
Durch kurze Schaltzeiten finden diese Typen auch Anwendung in der Hochfrequenz- und Computertechnik.

MOS-Fet: ca. 1 DM bis 18 DM

J-Fet: zur Steuerung von Verbrauchern mit hohen Leistungen
Preise > 100 DM

Größte Hersteller in Deutschland sind Siemens, Philips.
Fertigungsländer sind vor allem Niedriglohnländer wie Malaysia.

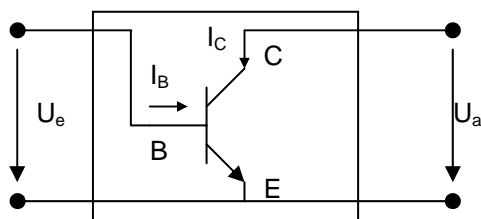
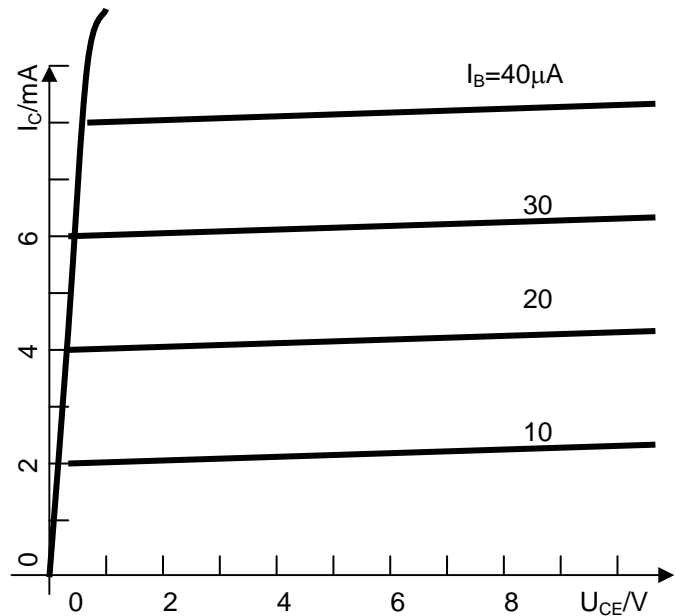
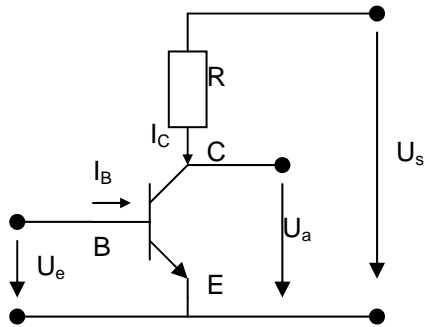
4.3 Grundschaltungen

Bei der Beschaltung von Transistoren werden 3 Grundschaltungen durch die Verwendung einer der drei Anschlüsse als gemeinsamen Bezugspunkt für die Eingangs-, Ausgangs- und Versorgungsspannung unterschieden. Je nach Aufgabenstellung kommen noch weitere Beschaltungselemente hinzu.

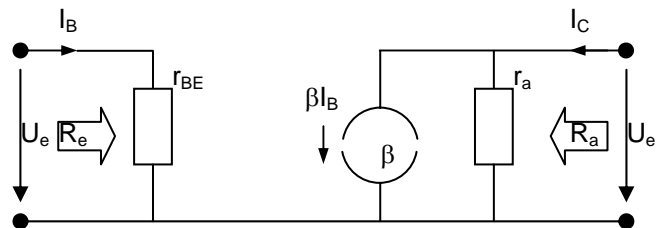
Die angegebenen Werte beziehen sich auf einen Kleinsignaltransistor mit folgenden Werten: $\beta_e = 100$, $I_E = 5 \text{ mA}$, $r_{BE} = 800 \Omega$

Emitterschaltung

Die Emitterschaltung ist die am häufigsten verwendete Verstärkerschaltung mit einer guten Strom- ($\beta_e \sim 100$) und Spannungsverstärkung ($V_u \sim 125$). Die Eingangs- und Ausgangswiderstände liegen bei ca. $< 1 \text{ k}\Omega$.



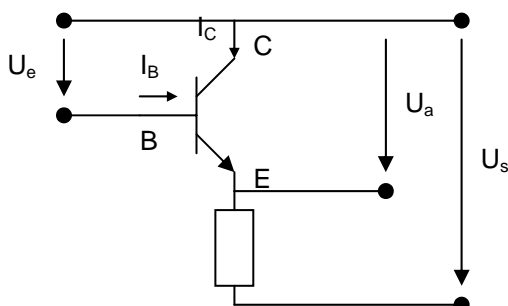
Der Transistor als Vierpol



Ersatzschaltung

Kollektorschaltung

Die Kollektorschaltung wird häufig bei Verstärkerschaltung als Eingangsstufe für hochohmige Quellen verwendet, mit einer Strom- ($\beta_e \sim 100$) und Spannungsverstärkung ($V_u \sim 1$). Der Eingangswiderstand liegt bei $100 \text{ k}\Omega$ und der Ausgangswiderstand liegt bei ca. 18Ω . Damit kann diese Schaltung auch als Impedanzwandlung eingesetzt werden.



Basisschaltung

Die Basisschaltung zeichnet sich durch ihren guten Frequenzgang vor allem für Hochfrequenzschaltungen aus, mit einer Strom- ($\beta_e \sim 1$) und Spannungsverstärkung ($V_u \sim 125$). Der Eingangswiderstand liegt bei 8Ω und der Ausgangswiderstand liegt bei ca. $1\text{ k}\Omega$. Damit kann diese Schaltung auch als Impedanzwandlung eingesetzt werden.

