
Vorlesung

Elektronische Bauelemente

Kapitel 1 und 2 mit Übungen

*Prof. Dr. H. Gesch
FH Landshut
Fachbereich Elektrotechnik*

0 Einleitung

Begriffsbestimmung:

- * **Elektronik** ist allgemein die Beschreibung elektrischer Erscheinungen, die sich durch die Bewegung von Elektronen (oder Ionen) im Vakuum, in Gasen oder in Festkörpern charakterisieren lassen, nicht aber die unmittelbaren Wirkungen von elektrischen und magnetischen Feldern. Heute versteht man unter Elektronik die Technik elektrischer Schaltkreise und Netzwerke, in denen elektronische Bauelemente verwendet werden. Schwerpunkte der Elektronik sind beispielsweise die Nachrichtentechnik, Leistungselektronik, elektronische Meßtechnik oder die Mikroelektronik.
- * **Elektronische Bauelemente** sind die Komponenten einer elektronischen Schaltung. Es werden ausschließlich elektrische Größen (z. B. Strom, Spannung) verarbeitet. Nichtelektrische Größen (z. B. Druck, Bestrahlungsstärke etc.) können in elektrische Signale umgewandelt werden. Derartige Bauelemente heißen Wandler oder Sensoren. Der Begriff *Bauelement* ist in DIN 40150 festgelegt

Elektronische Bauelemente lassen sich in zwei große Gruppen unterteilen:

- *passive* Bauelemente
- *aktive* Bauelemente

Bei beiden Gruppen unterscheidet man wiederum zwischen *nicht-linearen* und *linearen* Bauelementen. *Lineare* Bauelemente zeigen einen linearen funktionalen Zusammenhang zwischen Eingangsgröße und Ausgangsgröße, z.B. zwischen Strom und Spannung beim ohmschen Widerstand. Dagegen steigt bei einer Diode der Strom nichtlinear mit der Spannung an.

- * **Passive Bauelemente**

Passive Bauelemente übertragen das Eingangssignal ohne Verstärkung. Es besteht i.a. ein linearer oder nicht-linearer Zusammenhang zwischen Strom und Spannung. Zu den *linearen passiven* Bauelementen zählen: Widerstände, Kondensatoren, Spulen.
Zu den *nicht-linearen passiven* Bauelementen zählen: Dioden

- * **Aktive Bauelemente**

Sie können ein Eingangssignal verstärken oder können schwingen; sie benötigen i.a. eine Hilfsenergiequelle.
Zu den *linearen aktiven* Bauelementen zählen: Transistoren bei kleiner Aussteuerung
Zu den *nicht-linearen, aktiven* Bauelementen zählen: Transistoren bei großer Aussteuerung

- * **Anwendungsklassen**

Der Einsatz von Bauelementen ist nach Anforderungen und Anwendungsklassen eingeteilt. Typische Einsatzgebiete sind:

- industrieller Bereich (0°C bis +70°C)
- erweiterter industrieller Bereich (-25°C bis +85°C)
- militärischer Bereich (-55°C bis +125°C)

Typische Anforderungen sind beispielsweise:

- elektrische Sicherheit (z.B. nach VDE-Vorschrift)
- Umgebungstemperatur (vorallem bei Halbleiterbauelementen)
- elektrische Belastbarkeit
- Langzeitstabilität
- Größe, Gewicht, Preis

Die Anwendungsklassen sind in DIN 40040 beschrieben

* **Zuverlässigkeit**

Zuverlässigkeit ist ein Maßstab für die Eigenschaft eines Bauelementes, bei einer gegebenen Belastung innerhalb eines bestimmten Zeitraumes voraussichtlich fehlerfrei zu arbeiten. Man unterscheidet Früh-, Verschleiß- oder Zufallsausfälle. In der Regel wird in Datenblättern der mittlere Ausfallsabstand (MTBF = Mean Time Between Failure) angegeben.

* **Normreihen**

Die Nennwerte zahlreiche Bauelemente wie Widerstände und Kondensatoren sind in Normreihen abgestuft. Die Stufung ist in DIN 41426 festgelegt. Die Normreihe trägt den Kennbuchstaben **E**.

* **Datenblätter**

Sie geben Auskunft über die mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Bauelementes. Die Gliederung, der Inhalt und die verwendeten Kurzzeichen sind in DIN 41785 und DIN 41791 festgehalten. Das Datenblatt erhält:

- Kurzbeschreibung des Bauelementes
- Gehäusedaten
- Mechanische Daten
- Nennwerte
- Typische Werte
- Garantiewerte
- Grenzwerte

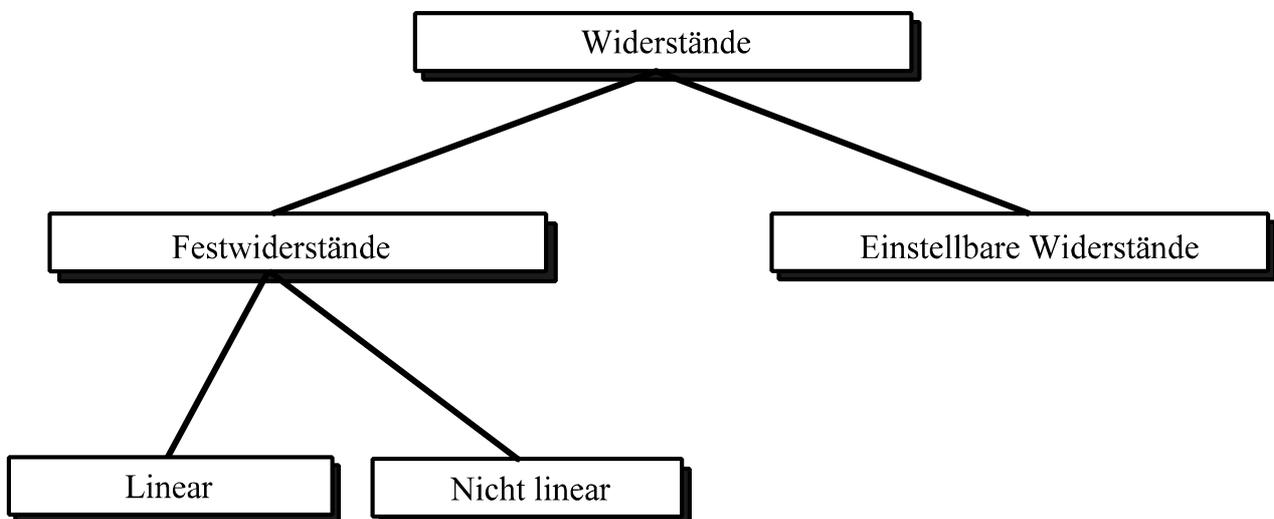
1. Widerstände

1.1 Übersicht

Im folgenden wird eine Übersicht über Klassifizierung und Kodierungsmethoden von Widerständen gegeben. Die beschriebenen Klassifizierungen und Kodierungen finden sich häufig in ähnlicher Form auch auf anderen Bauelementen wieder, z.B. bei Kondensatoren.

1.1.1 Klassifizierungen

Auf dem Markt erhältliche Widerstände lassen sich in folgendes Schema gliedern:



! Klassifizierung der Widerstände in E-Reihen:

Die große technische Bedeutung der Widerstände macht eine genaue Klassifizierung in Wertebereiche und Toleranzklassen erforderlich. Wie im einleitenden Kapitel Kap 0 beschrieben wurde, erfolgt die Einteilung der Widerstandswerte nach der sog. E-Reihe gemäß DIN 41426. Aufeinanderfolgende Werte unterscheiden sich immer um den gleichen Faktor q , den sogenannten Stufenfaktor. Der Faktor q errechnet sich wie folgt:

$$q = \sqrt[E]{10} \quad (1.1)$$

E ist die Nummer der Reihe. Bei der Reihe E6 errechnet sich der Stufenfaktor q wie folgt:

$$q = \sqrt[6]{10} = 1,467... \approx 1,5$$

E6 ±20%	E12 ±10%	E24 ±5%	E48 ±2%	E96 ±1%	E192 ±0,5%	E6 ±20%	E12 ±10%	E24 ±5%	E48 ±2%	E96 ±1%	E192 ±0,5%
100	100	100	100	100	100	220	220	220	180	180	180
				101	182						182
				102	184						184
				104	187						187
				105	187						187
			106	191	191						
			107	191	191						
			109	193	193						
			110	196	196						
			110	196	196						
	111	200	200								
	113	200	200								
	114	205	205								
	115	205	205								
	117	208	208								
	118	210	210								
	120	210	210								
	120	213	213								
	120	215	215								
	120	215	215								
121	218	218									
121	221	221									
123	221	221									
124	223	223									
126	226	226									
127	226	226									
127	229	229									
129	232	232									
130	232	232									
130	234	234									
133	237	237									
133	237	237									
135	240	240									
137	243	243									
137	243	243									
138	246	246									
140	249	249									
140	249	249									
142	252	252									
143	255	255									
143	255	255									
145	258	258									
147	261	261									
147	261	261									
149	264	264									
150	267	267									
150	267	267									
150	271	271									
152	274	274									
154	274	274									
154	277	277									
156	280	280									
158	280	280									
158	284	284									
160	287	287									
160	287	287									
162	291	291									
162	291	291									
164	294	294									
165	294	294									
166	298	298									
167	301	301									
169	301	301									
169	305	305									
172	309	309									
174	309	309									
174	312	312									
176	316	316									
176	316	316									
178	320	320									
178	324	324									
178	324	324									
178	328	328									
178	332	332									
178	332	332									
178	336	336									
330	330	330	332	332	332						

Tabelle: Widerstandswerte in Ω im Wertebereich zwischen 100Ω und 300Ω für die E-Reihen E6 bis E192

Für die Reihe E6 ergeben sich damit folgende Werte:

$$\begin{array}{rcl}
 & 1 & 3,3 \times 1,5 = 4,7 \\
 1 & \times 1,5 = 1,5 & 4,7 \times 1,5 = 6,8 \\
 1,5 & \times 1,5 = 2,2 & 10 \\
 2,2 & \times 1,5 = 3,3 & \text{u.s.w.}
 \end{array}$$

Eine derartige Reihe ergibt eine Werteabstufung zwischen den Dekaden. Von E-Reihe zu E-Reihe werden die Werte verdoppelt, d.h. es gibt die Reihen E3, E6, E12, E24, E48, E96, E192, usw.

Für die E-Reihen E6 bis E192 ergeben sich nach obiger Formel mit steigender E-Reihe immer feiner abgestufte Zwischenwerte. Für den Wertebereich zwischen 100Ω und 300Ω sind die Widerstandswerte in der Tabelle am Ende des Kapitels angegeben.

Die Kennzeichnung der Nennwerte erfolgt entweder nach der IEC-Farbtabelle mittels Farbringe oder durch IEC-Klartextbeschriftung.

! Farbring-Kodierung:

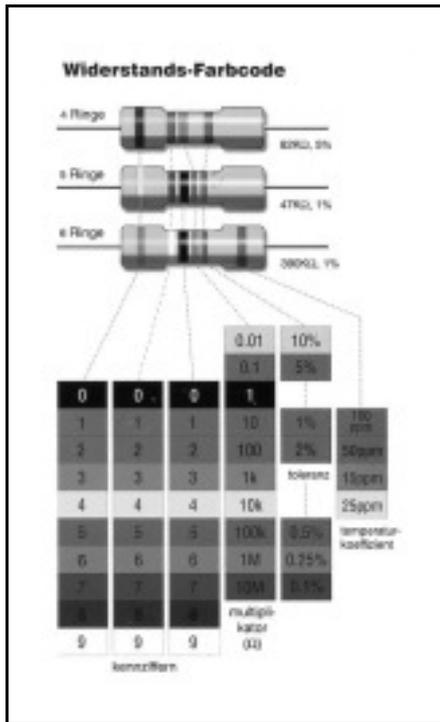
Häufig sind Farbkodierungen mit 4, 5 und 6 Farbringen zu finden. Der internationale Farbkode ist in DIN JEC 62 und JEC 115-1-4.5. festgelegt.

Bei einer Kodierung mit 6 Farbringen geben die ersten drei Ringe die Wertziffer an, der 4. Ring den Multiplikator, der 5. Ring die Toleranz und der 6. Ring den Temperaturkoeffizienten an.

Bei einer Kodierung 5 Farbringen fehlt der Ring für den Temperaturkoeffizienten, bei einer Kodierung mit 4 Farbringen außerdem der Ring für die 3. Wertziffer.

Der internationale Farbkode ist in der Tabelle zusammengestellt.

Kennfarbe	Widerstandswert in Ω		Toleranz	Temperaturkoeffizient in ppm/K
	Wertziffer	Multiplikator		
silber	-	10^{-2}	$\pm 10\%$	-
gold	-	10^{-1}	$\pm 5\%$	-
schwarz	0	1	-	± 200
braun	1	10	$\pm 1\%$	± 100
rot	2	10^2	$\pm 2\%$	± 50
orange	3	10^3	-	± 15
gelb	4	10^4	-	± 25
grün	5	10^5	$\pm 0,5\%$	-
blau	6	10^6	$\pm 0,25\%$	± 10
violett	7	10^7	$\pm 0,1\%$	± 5
grau	8	-	-	± 1
weiß	9	-	-	-



Farbcodes für Widerstände

! Klartext-Kodierung:

Beispiele für eine Beschriftung der Wertziffern in Klartext:

R10	≡	0,10Ω	10k0	≡	10,0 kΩ
1R0	≡	1,0Ω	1M2	≡	1,2 MΩ
10R1	≡	10,1Ω	5M7	≡	5,7 MΩ
1k2	≡	1,2 kΩ	1G0	≡	1,0 GΩ

Angabe des Temperaturkoeffizienten:

Symbol	T	E	C	K	J	L	D
ppm/K	± 10	± 25	± 50	± 100	± 150	± 200	+ 200 - 500

! Toleranzbereiche:

Mit aufsteigender E-Reihung verringern sich auch die zulässigen Toleranzen, d.h. jede E-Reihe besitzt eine ebenfalls genormte Toleranz.

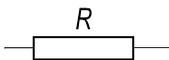
Beispiel: Reihe E6: ±20%

Reihe E12:	$\pm 10\%$
Reihe E24:	$\pm 5\%$

1.1.2 Fragen

- Was gibt die E-Reihe einer Widerstandsserie an?
- Nennen Sie zwei Kennzeichnungsmethoden von Widerständen
- In welcher Dimension werden Temperaturkoeffizienten von Widerständen angegeben?
- Häufig werden Festwiderstände nach der IEC-Farbtabelle mit 5 Farbringen markiert. Was geben die einzelnen Farbringe an?
- Manchmal werden Festwiderstände auch im Klartext beschriftet. Welche Widerstandswerte bedeuten die folgende Angaben: R10, 1K2, 5M7, 1G0
- Innerhalb einer Dekade werden Festwiderstände nach der E-Reihung abgestuft. Berechnen Sie für die Reihe E6 den Stufenfaktor und geben Sie die Widerstandswerte innerhalb einer Dekade an.
- Welche technischen Größen zusätzlich zu den Widerstandswerten sind mit der E-Reihung verknüpft?

1.2 Festwiderstände /1/, /2/

Schaltungssymbol: 

Einheit: Ohm (Ω) = V/A

1.2.1 Allgemeine Eigenschaften

Man versteht unter Festwiderständen im allgemeinen sogenannte Ohmsche Widerstände, die idealerweise einen linearen Zusammenhang zwischen Strom I und Spannung U aufweisen (Abb.1) und deren Widerstand ein fester Wert R ist, der aus der Steigung ermittelt wird.

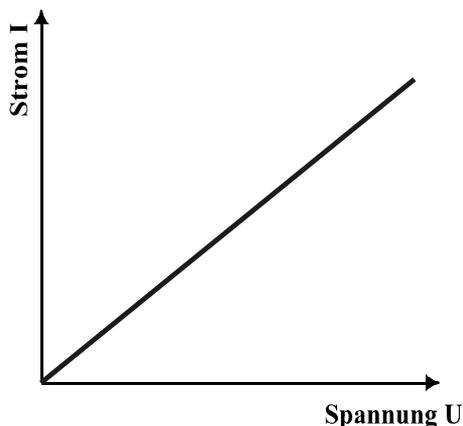


Abb. 1: Strom-/Spannungs-Kennlinie eines linearen Ohmschen Widerstandes

Die elektrische Energie wird in Wärme umgesetzt, die durch drei physikalische Mechanismen an die Umgebung abgeführt wird: Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung.

a) Wärmeleitung

Die Wärmeabfuhr erfolgt als Wärmestrom I_w in der Regel über die Anschlußdrähte oder die Befestigungsschellen (sofern vorhanden). Es wird dabei in der Zeit t die Wärmeenergie Q_w an die Umgebung abgeleitet. Der Anschlußdraht (Befestigungsschelle) weist den Wärmewiderstand R_w auf; die Temperaturdifferenz zwischen Bauelement und Umgebung beträgt $\Delta\vartheta$. Damit ergibt sich für den Wärmestrom I_w :

$$I_w = Q_w/t = \Delta\vartheta/R_w \sim \Delta\vartheta \quad (1.2)$$

Der Wärmewiderstand R_w ist gegeben durch folgenden Ausdruck:

$$R_w = \frac{\Delta\vartheta}{I_w} = \frac{l}{\lambda_w} \cdot \frac{l}{A} \quad (1.3)$$

Mit l und A werden die Länge und die Querschnittsfläche des Wärmeleiters bezeichnet. λ_w ist die Wärmeleitfähigkeit. Die Werte für einige bekannte Medien sind in der folgenden Tabelle gegeben:

Material	Wärmeleitfähigkeit in W/K·m
Kupfer	380
Aluminium	210
Keramik	1,5
Wasser	0,55
Luft	0,025



Merke:

Wärmeleitung durch Anschlußdrähte spielt nur bei Bauelementen mit kleinem Volumen eine nennenswerte Rolle

b) Konvektion

Der Wärmestrom durch Konvektion ist gegeben durch folgenden Ansatz:

$$I_w = k \cdot A_o \cdot \Delta\vartheta \sim \Delta\vartheta \quad (1.4)$$

mit: k = Wärmeabgabekoeffizient in $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$
 A_o = Oberfläche des Bauelementes
 $\Delta\vartheta$ = Temp.-Differenz Oberfläche zur Umgebung

c) Wärmestrahlung

Die Wärmeabgabe durch Strahlung wird durch das Plank'sche Strahlungsgesetz beschrieben. Hierin gilt:

$$I_w \sim \Delta\vartheta^4 \quad (1.5)$$



Merke:

Allgemein gilt:
 Bis zu einer Temperatur von ca. 300°C überwiegt die Wärmeabfuhr durch Konvektion, für Temperaturen $> 500^\circ\text{C}$ überwiegt die Wärmeabfuhr durch Strahlung.

d) Temperaturanstieg

$$\Delta\vartheta = \vartheta_{\max} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{Z}\right) \right] \quad (1.5)$$

Der Temperaturanstieg eines belasteten Bauelementes endet, wenn das thermische Gleichgewicht zur Umgebung erreicht ist, d.h. wenn die pro Zeit abgegebene Wärmemenge gleich der pro Zeiteinheit im Widerstand erzeugten Verlustwärme ist. Die zeitliche Erwärmung $\Delta\vartheta$ (Oberflächentemperatur ϑ_O minus Umgebungstemperatur ϑ_A) relativ zur Umgebungstemperatur läßt sich durch folgenden Ausdruck beschreiben: wobei ϑ_{\max} die maximal zulässige Betriebstemperatur des Bauelementes darstellt. Z heißt thermische Zeitkonstante des Bauelementes; diese ist gegeben durch:

$$Z = \frac{C}{W} = \frac{c \cdot m}{W} \quad (1.6)$$

hierin ist: C die Wärmekapazität des Bauelementes in $W \cdot s/K$
 c die spezifische Wärme des Bauelementes in $W \cdot s/K \cdot g$
 m die Masse des Bauelementes in g
 W = Erwärmungskonstante in W/K \equiv summarische Betrachtung der Wärmeabgabefähigkeit des Bauelementes

**Merke:**

Ein Bauelement erwärmt sich umso schneller je kleiner seine Wärmekapazität ist und je kleiner seine Masse ist; daraus ergibt sich ein wichtiger Sachverhalt

e) Lastminderungskurve

Ist thermisches Gleichgewicht erreicht, ergibt sich die maximal zulässige Belastung $P_{Z, \max}$ des Widerstandes für den Dauerbetrieb aus obiger Formel:

$$P_{Z, \max} = W \cdot \Delta\vartheta_{\max} = W \cdot (\vartheta_O - \vartheta_A) = \frac{(\vartheta_O - \vartheta_A)}{R_{th}} \quad (1.7)$$

Die Größe W in W/K wird auch als Erwärmungskonstante bezeichnet, die diejenige im Widerstand umgesetzte Verlustleistung angibt, die bei einer Umgebungstemperatur von $25^\circ C$ und ruhender Luft die Temperatur des Bauelementes gerade um $1^\circ C$ erhöht.

Beachte: Die Erwärmungskonstante ist abhängig von der Größe des Bauelementes, der Beschaffenheit der Oberfläche, von den Anschlußdrähten, der Anschlußart, dem umgebenden Medium usw.

Beachte: Die maximal zulässige Belastbarkeit, d.h. die maximal im Widerstand zulässige Verlustleistung ist umso größer je größer die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ ist (bei gleicher Wärmeabgabefähigkeit W) oder je größer der Wärmeabgabefähigkeit d.h. je kleiner der Wärmewiderstand R_{th} (bei gleicher Temperaturdifferenz) ist.

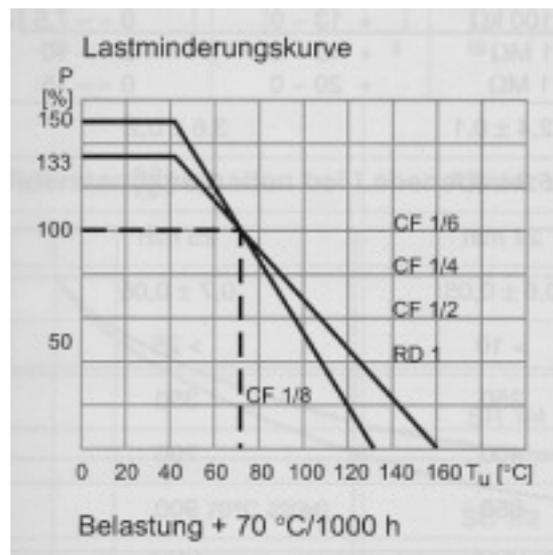


Abb. 2: Typische Lastminderungskurve eines Kohlewiderstandes /3/

Bei Erhöhung der Umgebungstemperatur darf der Widerstand unter Umständen nicht mehr mit der gleichen Leistung betrieben werden. In DIN 44051 ist festgelegt, daß die sog. Nennleistung P_N eines Widerstandes für eine Umgebungstemperatur von 70°C anzugeben ist. Mit dieser Leistung darf der Widerstand bei einer Temperatur von 70°C dauernd betrieben werden. Für andere Temperaturen ist die zulässige Leistung P_Z des Widerstandes höher oder niedriger als die Nennleistung; die zulässige Leistung ist aus der sog Lastminderungskurve (Derating Curve) zu entnehmen.

Definition:

Die Lastminderungskurve gibt an, auf welche zulässige Leistung die Belastung des Widerstandes zu reduzieren ist (bzw. erhöht werden darf), wenn die Umgebungstemperatur ϑ_A den Wert von 70°C überschritten (bzw. unterschritten) hat.

f) Temperaturkoeffizient

Für eine physikalische Größe X läßt sich in der Regel allgemein ein Temperaturkoeffizient α oder TK_X angeben:

$$\alpha_X = \frac{1}{X_0} \cdot \frac{dX}{d\vartheta} \quad (1.8)$$

Die Normierung auf den Wert X_0 erfolgt bei der Temperatur ϑ_0 , die i. a. bei 25°C liegt.

Der TK-wert wird oft in Einheiten von ppm/K oder ppm/ $^\circ\text{C}$ (parts per million = 10^{-6}) angegeben.

Für den Temperaturkoeffizienten eines Widerstandes ist anstelle von X der Buchstabe R zu setzen.

Die einzelnen Materialien, aus denen Widerstände hergestellt werden, weisen sehr unterschiedliche Temperaturkoeffizienten auf, sowohl was den TK-Wert anbetrifft als auch hinsichtlich des Ganges der Widerstandesänderung mit der Temperatur.

Der Fall a) ist bei sehr reinen ferromagnetischen Materialien zu finden. Bei kleinsten Verunreinigungen liegt der Fall b) vor. Ziel von Metall-Legierungen ist es, einen möglichst flachen Verlauf der Widerstandsänderung mit der Temperatur zu erzielen. Der negative TK bei Halbleitern wird in einem späteren Kapitel erläutert.

Aus dem Verhalten des TK resultiert eine Drift des Widerstandes R bzw. des spezifischen Widerstandes ρ , die bei kleinen Temperaturänderungen $\Delta\vartheta$ sich wie folgt beschreiben lässt:

$$\begin{aligned} R &= R_0 \cdot (1 + TK_R \cdot \Delta\vartheta) \\ \rho &= \rho_0 \cdot (1 + TK_\rho \cdot \Delta\vartheta) \end{aligned} \quad (1.9)$$

Für große Temperaturbereiche kann ein Näherungsansatz verwendet werden, der allerdings nur einen begrenzten Gültigkeitsbereich hat:

$$R = R_0 \cdot (1 + TK_{R1} \cdot \Delta\vartheta + TK_{R2} \cdot (\Delta\vartheta)^2)$$

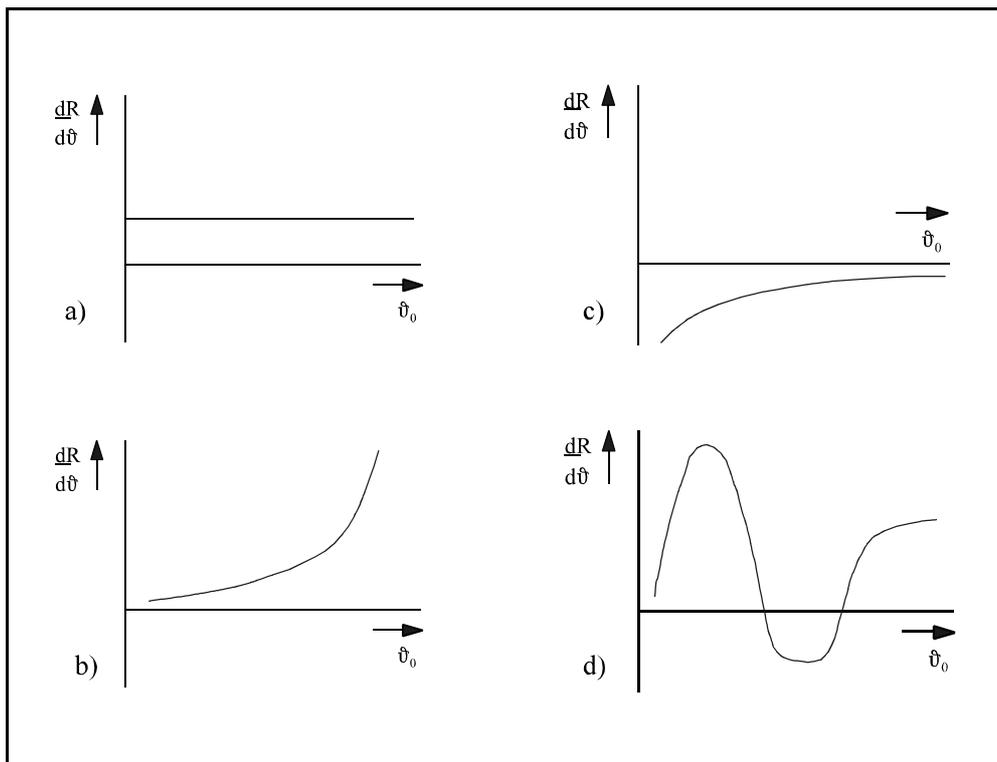


Abb. 3: Qualitativer Verlauf des Temperaturkoeffizienten verschiedener Materialien:

- | | |
|----------------------|-----------------------------|
| a) spezielle Metalle | c) halbleitende Materialien |
| b) Metalle allgemein | d) Metall-Legierungen |

g) Impulsbelastbarkeit

Werkstoffe für Widerstände können kurzzeitig wesentlich höhere Leistungen aufnehmen als im Dauerbetrieb. Dabei ist zu unterscheiden, ob es sich um eine periodische Pulsfolge oder um vereinzelte Impulse hoher Spitzenleistung handelt.

! Periodische Pulsfolge:

es sind Spitzenlasten bis zum Mehrfachen (z.B. sechsfachen) der Nennlast möglich; Einzelheiten sind in einer DIN-Vorschrift definiert. Es kann ein thermischer Auslastungsfaktor angegeben werden:

$$n_{th} = \frac{\text{mittlere Pulsleistung}}{\text{Nennleistung}} = \frac{\overline{P}}{P_N} \quad (6)$$

$$\overline{P} = \text{Pulsenergie} \times \text{Pulsfolgefrequenz}$$

! Vereinzelte Pulse hoher Spitzenleistung:

es existiert keine Normung; Einzelheiten sind den Datenblättern zu entnehmen; die Belastbarkeit des Bauelementes hängt hier stark von der Pulsform und der Pulsbreite ab.

h) Maximale Dauerspannung

Abhängig von der Größe des Bauteils wird in den Datenbüchern eine maximale Dauerspannung angegeben; für kleine Abmessungen liegt U_{\max} zwischen 200V und 350V, bei größeren Ausführungsformen zwischen 500V bis 750V; spezielle Hochspannungswiderstände erlauben auch wesentlich höhere Dauerspannungen

i) Frequenzabhängigkeit

Der Frequenzgang eines linearen Widerstandes hängt stark von seinem Aufbau und von seinem Widerstandswert ab. Allgemein weist jeder Widerstand induktive und kapazitive Blindwiderstands-Anteile auf; ein allgemein gültiges Ersatzschaltbild läßt sich wie folgt angeben:

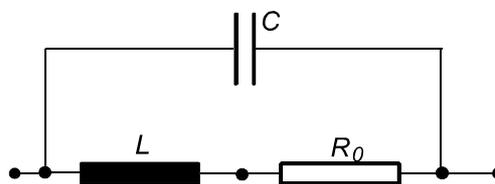


Abb. 3: Allgemeines Ersatzschaltbild eines Widerstandes

Daraus resultiert ebenso allgemein der Frequenzverlauf des Widerstandes abhängig davon, ob induktive oder kapazitive Anteile überwiegen:

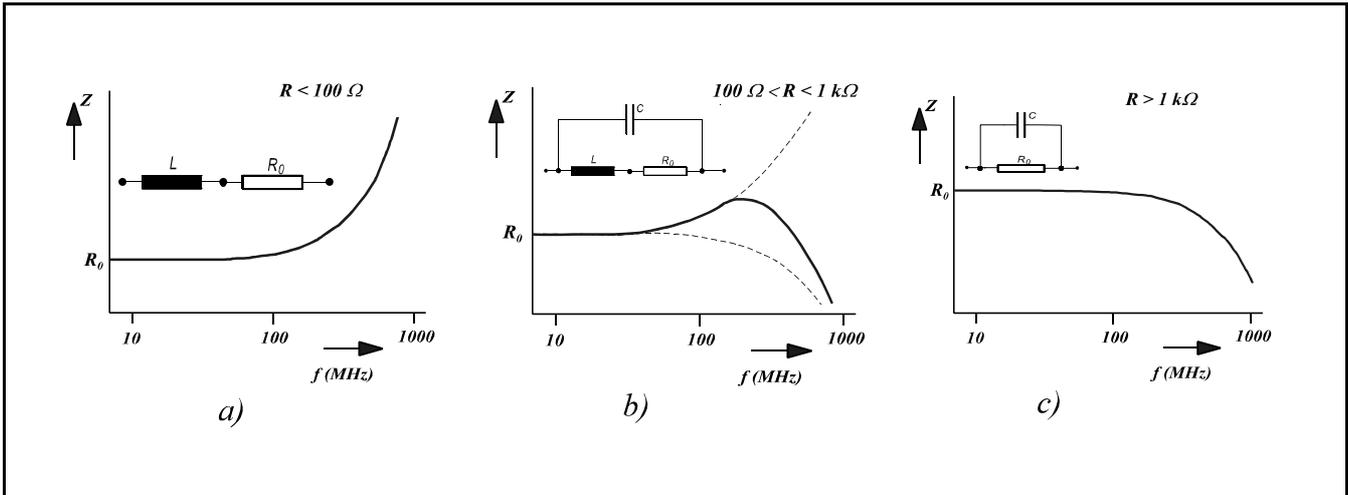


Abb. 4: Allgemeiner Frequenzgang eines Widerstandes:

a) Tiefpassverhalten

b) Resonanzerscheinungen

c) Hochpassverhalten



Merke:

Bei niederohmigen Widerständen überwiegt i.a. der induktive Blindanteil, bei hochohmigen dagegen der kapazitive Blindanteil



Merke:

Draht- und gewendelte Widerstände haben die größten induktiven und kapazitiven Blindanteile; ungewendelte Schichtwiderstände haben bis über 100 MHz einen fast konstanten Widerstandswert

j) Widerstandsrauschen

Rauschen macht sich bemerkbar durch stochastische Schwankungen eines “konstanten” Strom- oder Spannungswertes; der gemessene sog. Gleichstrom bzw. -spannung ist lediglich ein im zeitlichen Mittel konstanter Wert, der durch unregelmäßige Schwankungen i.a. großer Bandbreite und kleiner Amplitude überlagert ist. Die Ursachen des Rauschens sind vielfältig und haben ihren Ursprung in der atomaren Struktur der stromdurchflossenen Widerstandsschicht, in thermischen Einflüssen und den Übergängen zwischen der Widerstandsschicht und den Kontakten. Es wird unterschieden zwischen:

! Thermisches Rauschen:

es kommen fast alle Frequenzen im Spektrum vor, deshalb spricht man auch vom “Weißen Rauschen” oder “Nyquist-Rauschen”, benannt nach dem Physiker, der dieses Phänomen untersucht hat.

Der Effektivwert der Leerlauf-Rauschspannung ist gegeben durch:

$$\sqrt{\overline{U^2}} = \sqrt{4 \cdot k \cdot \Delta f \cdot R \cdot T} \quad (1.10)$$

Δf = Frequenzband in der Schaltung

Im Widerstand erzeugte Rauschleistung:

$$P_R = 4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f \quad (1.11)$$

k = Boltzmann-Konstante

T = absolute Temperatur

! Stromrauschen:

Stromrauschen entsteht durch Schwankungen in der Leitfähigkeit in der Widerstandsschicht z. B. an Korngrenzen in einer polykristallinen Struktur oder in Raumladungszonen. Stromrauschen wird vorwiegend in Kohleschicht-Widerständen beobachtet; in Drahtwiderständen ist Stromrauschen vernachlässigbar.

Im Unterschied zum Thermischen Rauschen nimmt das Stromrauschen mit $1/f$ ab, d.h. es kommen nicht alle Frequenzen im Spektrum vor, man spricht daher auch vom "farbigen Rauschen"; oberhalb von ca. 20 kHz ist dieser Rauschanteil vernachlässigbar.

! Kontaktrauschen:

es ist erkennbar durch einen überlinearen Anstieg mit dem Widerstandswert R und tritt bei stromdurchflossenen Kontakten auf; starkes Kontaktrauschen ist ein untrügliches Zeichen für schlechte Kontakte ("kalte" Lötstelle, höherer Übergangswiderstand am Kontakt, bevorstehender Ausfall des Bauelementes).

! Stromrauschindex:

In der Praxis wird das Rauschen summarisch durch Angabe eines sog. Stromrauschindex A_I betrachtet:

$$A_I = 20 \cdot \log \frac{U_{0f}}{U_{\text{=}}} \quad [dB] \quad (1.12)$$

mit: $U_{\text{=}}$ = am Widerstand anliegende Gleichspannung

U_{0f} = Stromrauschspannung im Δf -Bereich 618 Hz bis 1618 Hz (DIN 44049)

Die Stromrauschspannung U_{0f} ist gegeben durch folgenden Ausdruck:

$$U_{0f} = \sqrt{(\text{gem. Gesamtrauschspannung})^2 - (\text{berechn. Wärmerauschspannung})^2}$$

k) Spannungsabhängigkeit

Jeder Widerstand weist eine wenn auch geringe Abhängigkeit des Widerstandswertes von der angelegten Spannung auf. Diese Eigenschaft wird durch Angabe des sog. "Spannungskoeffizienten" VCR beschrieben: Eine mögliche Berechnung des VCR ist:

$$VCR = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \cdot \frac{10^6}{U_2 - U_1} \left[\frac{ppm}{V} \right] \quad (1.13)$$

mit: U_2 = maximale Arbeitsspannung

$U_1 = U_2 / 10$

$R_2 =$ bestimmt bei U_2

$R_1 =$ bestimmt bei U_1

Im Wechselstrombetrieb bei hohen Frequenzen verursacht die Nichtlinearität Oberwellen, was das sog. "Klirren" hervorruft.

Werte des VCR für einige Typen von Widerständen sind in der folgenden Tabelle angegeben /1/:

Widerstandswert	Meßspannung in [V]	VCR in ppm/V			
		Kohle-Widerst.	Metall-Widerst.	Metalloxid-W.	Metallglasur-W.
100 Ω	3,2	0,6	0,06	0,06	6
1 k Ω	10	0,2	0,02	0,02	2
1 k Ω	32	0,3	0,06	0,06	60
100 k Ω	100	0,1	0,02	0,02	20

1.2.1.2 Fragen

- Nennen Sie die 3 wichtigsten physikalischen Mechanismen der Wärmeabfuhr in Widerständen. In welchen Temperaturbereichen spielen sie eine Rolle?
- Was gibt die Lastminderungskurve an? Von welchen Bauelementegrößen hängt die Lastminderungskurve ab?
- Was gibt der Temperaturkoeffizient an und in welchen Einheiten wird dieser üblicherweise angegeben?
- Welches Vorzeichen hat typischerweise der Temperaturkoeffizient bei Metallen und reinen halbleitenden Materialien?
- Aufgrund welcher bauteilespezifischer Merkmale weist ein Ohmscher Widerstand einen Frequenzgang auf?
- Der Frequenzgang eines Ohmschen Widerstandes hängt von dessen Widerstandswert ab. Welche typischen Frequenzverläufe kennen Sie und durch welche Elemente bestimmen diese Verläufe?
- Nennen Sie drei typische Rauschteile, die im Spektrum des Widerstandsrauschens auftreten können.
- Was versteht man unter dem VCR?
- Welchen unerwünschten Effekt verursacht eine Spannungsabhängigkeit eines Ohmschen Widerstandes in Geräten und in welchem Anwendungsbereich macht sich diese bemerkbar?

1.2.2 Bauformen von Festwiderständen:

Gute Übersicht über elektrische Eigenschaften (Datenblätter) und technische Daten (Abmessungen, Normen, Lieferbarkeit) bieten /2/ und Bauteile-Kataloge wie /3/, /4/, /5/.

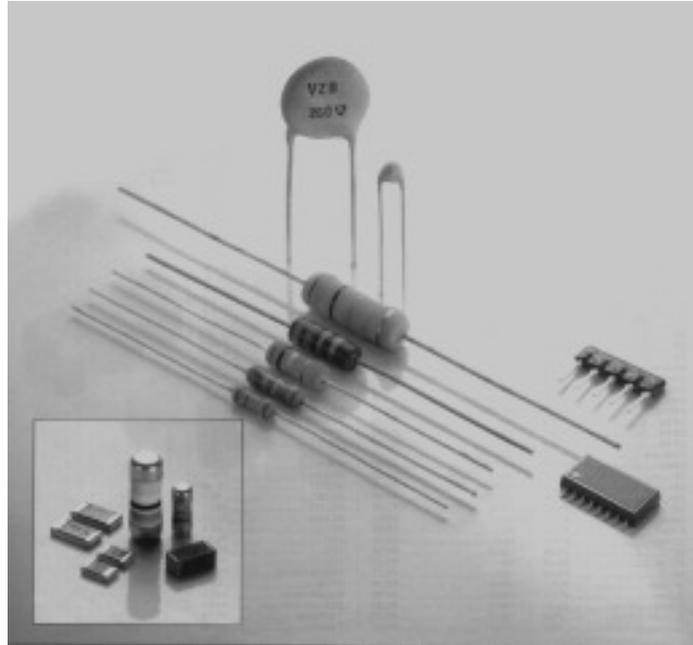


Abb. 4: Typische Bauformen diverser Typen von Festwiderständen /3/

1.2.2.1 Drahtwiderstände

! Aufbau:

- Trägerkörper: Keramikrohre, Keramikstäbe, Fiberglas für Spezialanwendungen mit der Forderung nach besonders hoher Wärmeleitfähigkeit auch Berylliumoxid (80% höhere Belastbarkeit)
- Material des Widerstandsdrahtes: Konstantan (Cu-Ni), Manganin (Cu-Ni-Mn), Nickelin (Ni-Cr), Au-Cr
- Isolation zwischen den Wicklungen: Umspinnung, Lack oder Oxidschichten
- gute Kontaktierung erforderlich, sonst treten Rauschen, undefinierte Widerstandserhöhungen, Sperrschichten mit Gleichrichtwirkung (gefährlich bei Wechselstrombetrieb) auf.
- Temperaturkoeffizient ist abhängig von verwendeten Drahtmaterial

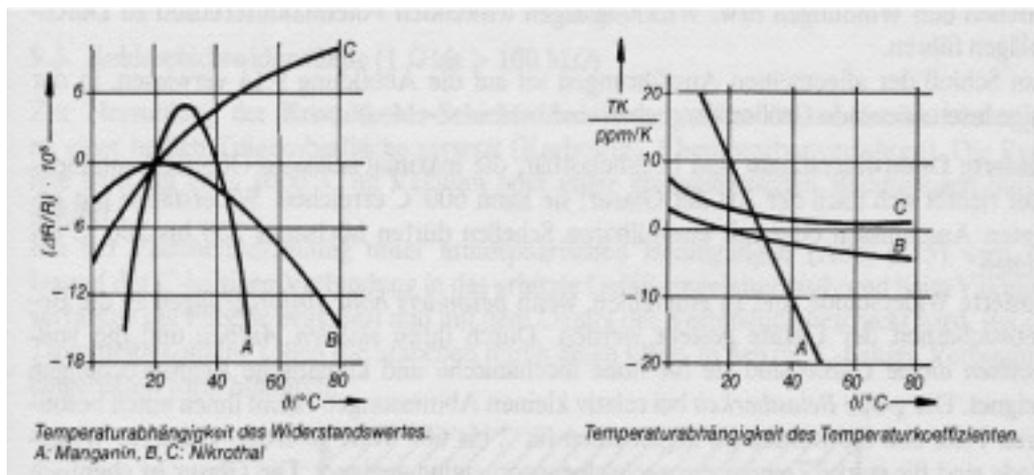


Abb. 5: Temperaturkoeffizienten von Manganin und Konstantan als Funktion der Temperatur /1/

! Physikalische Eigenschaften:

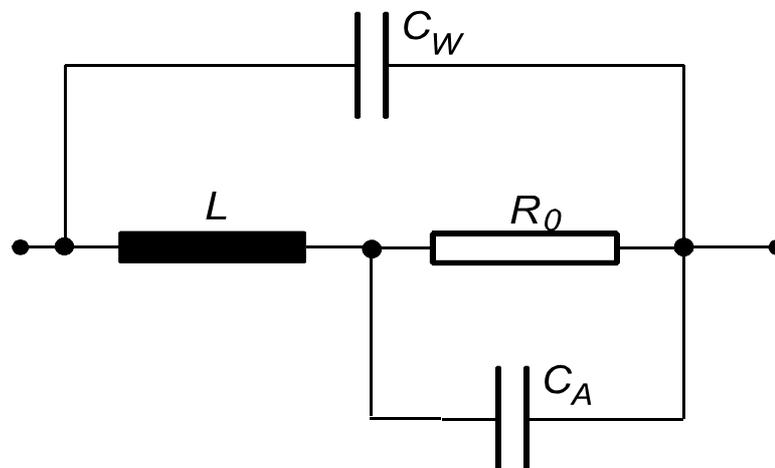


Abb. 6: Ersatzschaltbild eines Drahtwiderstandes mit dem Gleichstromwiderstand R_0 ; für Hochfrequenzanwendungen sind die Selbstinduktivität L sowie die Kapazitätsanteile der Anschlüsse C_A und der Wicklungen C_W zu berücksichtigen.



Merke:

jeder Drahtwiderstand besitzt eine Induktivität L (bis mH)
jeder Drahtwiderstand besitzt eine Kapazität C (bis nF)

Unterdrückung dieser Effekte durch induktivitäts- und kapazitätsarme Wicklungen, z.B. Chaperon-, Bifilar-, Wagner-Wertheimer-Wicklung.

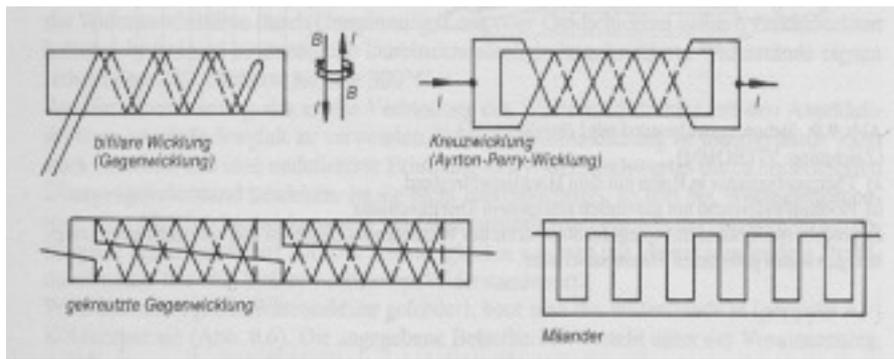


Abb. 7: Beispiele für Wicklungsformen bei Drahtwiderständen //



Regel:

$R < 100 \Omega$ Induktivität überwiegt
 $R > 1 \text{ k}\Omega$ Kapazität überwiegt
 gute Werte (sog. "High Speed"-Ausführung: $C < 1\text{pF}$, $L < 1 \mu\text{H}$)

- Besonderheiten von Drahtwiderständen:
 Hohe Frequenzen führen zum Skin-Effekt
 Künstliche Alterung des Drahtes erforderlich (s. Abbildung)
 Thermospannung wegen Temperaturgefälle zwischen den Lötstellen

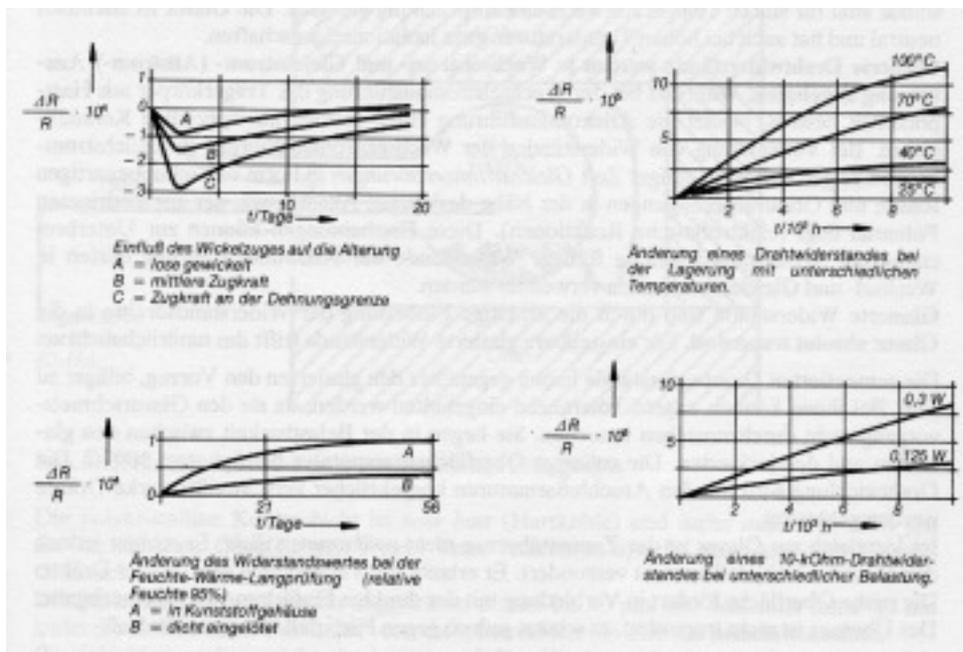


Abb. 8: Änderungen des Widerstandes bedingt durch unterschiedliche innere und äußere Belastungen des Drahtes //

- Temperaturbelastbarkeit hoch:
lackierte Widerstände bis 200 °C
oxidierte Widerstände: T > 300 °C möglich
 sehr feste Haftung der Oxidschicht
 hohe Durchschlagfestigkeit der Oxidschicht
 große Wärmeabfuhr erforderlich, evt. mit Kühlkörper ausrüsten

! Anwendungsbereiche und Ausführungsformen:

- erhältlich im Wertebereich 0,1 Ω bis ≈ 100 kΩ
- Besondere Ausführungen von Drahtwiderständen:
Glasierte Drahtwiderstände
 - Glasur ist vollkommen dicht
 - hoch belastbar (bis 600 Watt!)
 - hohe Oberflächentemperaturen möglich, Isolationseigenschaften bleiben erhalten
 - Einsatz für besonders hohe Anforderungen an die Betriebssicherheit
z. B. hohe mechanische und klimatische Beanspruchung (tropenfest)
 - stabiler Aufbau

Zementbeschichtete Drahtwiderstände

- billigere Bauelemente als glasierte Widerstände
- zulässige Oberflächentemperatur < 300 °C
- Zementierung ist nicht vollkommen dicht, schützt Draht jedoch vor Verzunderung

Silikonumhüllte Drahtwiderstände

- überzogen mit einer nichtentflammaren Silikonmasse
- auch bei Überlast kein Abtropfen des Überzugs

Sicherungswiderstände

- Unterbrechung des Stromkreises bei Überlast
z.B. durch Aufschmelzen einer Lötstelle

Zero-Ohm-Drahtbrücke

- isolierte Drahtbrücke zur widerstandslosen Punkt-zu-Punkt-Verbindung

Chassis-Widerstände

- Einsatz für hohe Leistungen (bis 500 Watt)

einstellbaren Widerständen (Potentiometer)

Präzisionswiderständen mit Toleranzen bis 0,005% möglich (besser als bei Metallschicht-Widerständen!)

- Überblick über Bauformen und Typen

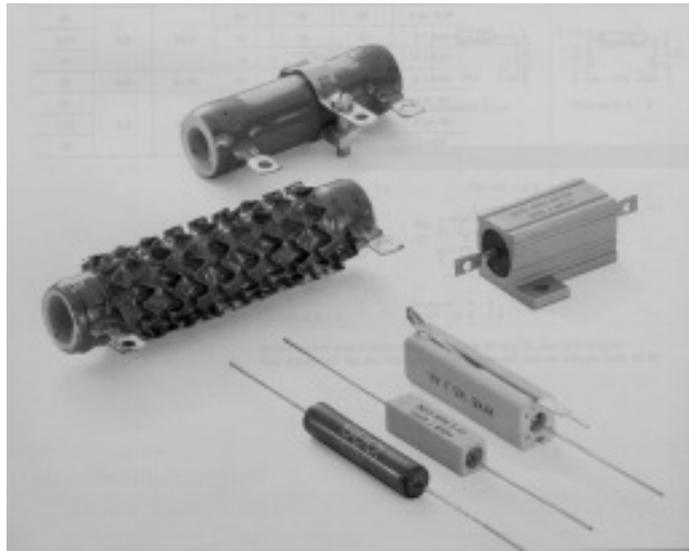


Abb. 9: Typische Ausführungsformen von Drahtwiderständen /3/

1.2.2.2 Kohleschichtwiderstände

! Aufbau und physikalische Eigenschaften:

a) Kristallkohle-Schichtwiderstände

Herstellung: Karbowid-, Chemocarbonverfahren

- Abscheidung einer kristallinen Glanzkohle-Schicht durch pyrolytische (thermische) Spaltung von Kohlenwasserstoffen auf keramischen Oberflächen unter atmosphärischen Bedingungen bei ca. 1000 °C (Flaschenbekohlung, Trommelbekohlung) oder im Vakuum
- Katodenstrahlzerstäubung (Sputtern)
- Eigenschaften der polykristallinen Kohleschicht:
 - sehr harte, widerstandsfähige Schicht
 - sehr feste Haftung auf keramischen Oberflächen
 - Schichtdicken: 10nm bis 10 µm je nach Widerstandswert
 - spezifischer Widerstand ca. 40 Ω mm²/m
 - Problem: inhomogenes Schichtwachstum bei dünnen Schichten führt zu höherem Rauschen und größeren Toleranzbereichen
- Ankontaktierung durch Aufziehen von Metallkappen oder Anlöten an metallisierten Randbereich der Kohleschicht (teureres Verfahren)
- Ummantelung mit einer Lackschicht

bei hohen Widerstandswerten muß die Schicht gewendelt werden

- Einschleifen einer schraubenförmigen Trenn-Nut etwa > 0,2 mm breit (z.B. mit dem Laser)

- Problem: Trenn-Nuten führen zu kleineren Betriebsspannungen und großen L- und C-Werten!

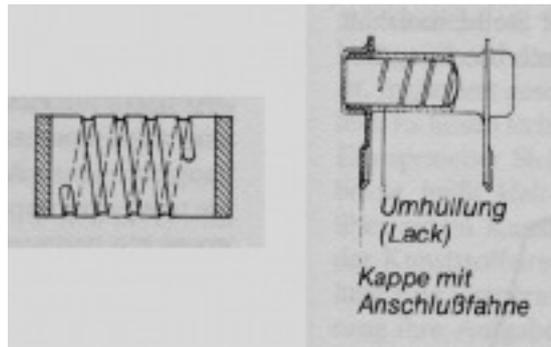


Abb. 10: Wendelung von Kohleschichten und Gesamtaufbau eines Kohleschichtwiderstandes /1/

b) Kolloidkohle-Schichtwiderstand

Herstellung:

- Kohlenstoffpulver wird in nichtleitendem Bindemittel kolloidal gelöst
- Beschichtung des Trägers durch Tauchen, Aufstreichen, Aufspritzen
- Einstellung des Widerstandswertes durch das Mischungsverhältnis und durch Laserabgleich
- Eigenschaft der kolloidalen Kohlenstoffschicht:
 - schlechter als Kristallkohleschicht wegen losem Kontakt der Partikel
 - Schichtdicken etwa $20\ \mu\text{m}$
 - spezifischer Widerstand $0,2\ \Omega\ \text{cm}$ bis $200\ \text{k}\Omega\ \text{cm}$
- großer negativer Temperaturkoeffizient (s. Abbildung)

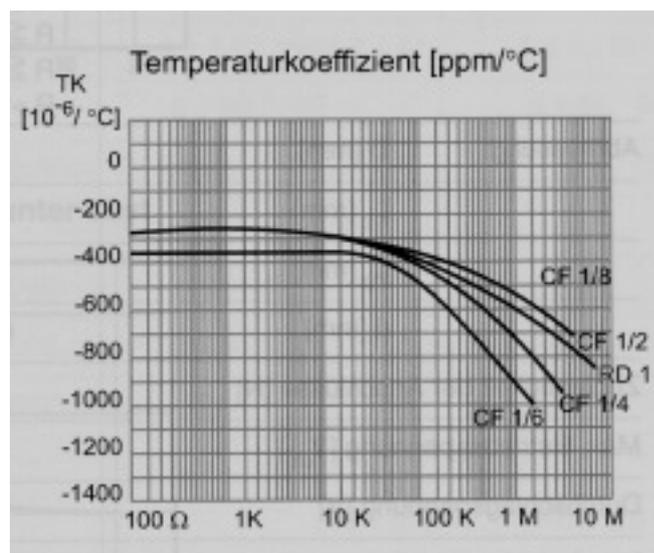


Abb. 11: Temperaturkoeffizient eines Kohleschicht-Widerstandes als Funktion des Widerstandswertes /3/

 **Merke:** Unabhängig vom Herstellungsverfahren weisen Kohleschichtwiderstände einen stark negativen Temperaturkoeffizienten (-200 ppm/K bis -1000 ppm/K) auf, der von der Schichtdicke abhängig ist!

! Anwendungsbereiche und Ausführungsformen:

- erhältlich im Widerstandsbereich 1 Ω bis 10 M Ω , Standardtoleranz $\pm 5\%$ (eingengt $\pm 2\%$)
- Universalwiderstand, am häufigsten verwendeten Gruppe von ohmschen Widerständen,
- Verwendung in der Unterhaltungselektronik

1.2.2.3 Kohlemasse-Widerstände

! Aufbau und physikalische Eigenschaften:

- Kohlenstoff mit organischem Bindemittel vermischt und zu massiven Stäbchen gepreßt
- Änderung des Mischungsverhältnisses führt zu einer Änderung des spezifischen Widerstandes (0,1 m Ω cm bis 1 k Ω cm)
Nachteil: weniger Kohlenstoffanteil im Verhältnis zum Bindemittel
 \Rightarrow schlechtere Kontakte, höheres Rauschen, höhere Spannungsabhängigkeit
- sehr hoher Temperaturkoeffizient (im Prozentbereich)
geringer Betriebstemperaturbereich (< 150°C)
nur für geringe Leistungen einsetzbar (< 2W)
- Toleranzbereich 10%

! Anwendungsbereiche und Ausführungsformen:

- erhältlich im Wertebereich 2 Ω bis 20 M Ω , Standardtoleranz $\pm 10\%$ (eingengt $\pm 5\%$)
- Masse-Widerstände sind robust, billig, können bei Überlastung explodieren

 **Merke:** **Masse-Widerstände werden nur wenig verwendet!**

1.2.2.4 Metallschichtwiderstände

a) Edelmetalle

! Aufbau und physikalische Eigenschaften:

- Herstellungsverfahren: Material: Au - Pt

Aufdampfen im Vakuum, Katodenstrahlzerstäubung (Sputtern), Reduktion von Edelmetallsalzen beim Einbrennen, Substrat i.a. Keramik

- geringer Toleranzbereich: $\pm 0,1$ bis $\pm 2\%$
- Temperaturkoeffizient: $+200$ bis 350 ppm/K
- max. Belastbarkeit: bis 6 Watt

! Anwendungsbereiche und Ausführungsformen:

- relativ niederohmige Widerstände, Nullohm-Widerstand
- Verwendung als Sicherungswiderstände, Temperaturkompensation

b) Metall-Legierungen

! Aufbau und physikalische Eigenschaften:

- Herstellungsverfahren:
Material: Legierungen wie Ni - Cr
Aufdampfen im Vakuum, Katodenstrahlzerstäubung (Sputtern), Galvanische Verfahren (Elektrolyse), Substrat i.a. Keramik, genaue Einstellung des Wertes durch Wendelung
- sehr kleine Temperaturkoeffizienten erzielbar: z.B. NiCr bei 20 nm Schichtdicke und 44%Cr-Anteil ist der TK näherungsweise Null
- Toleranzen: $\pm 0,1$ bis $\pm 1\%$
kleiner Temperaturkoeffizient : $0 - 50$ ppm/K

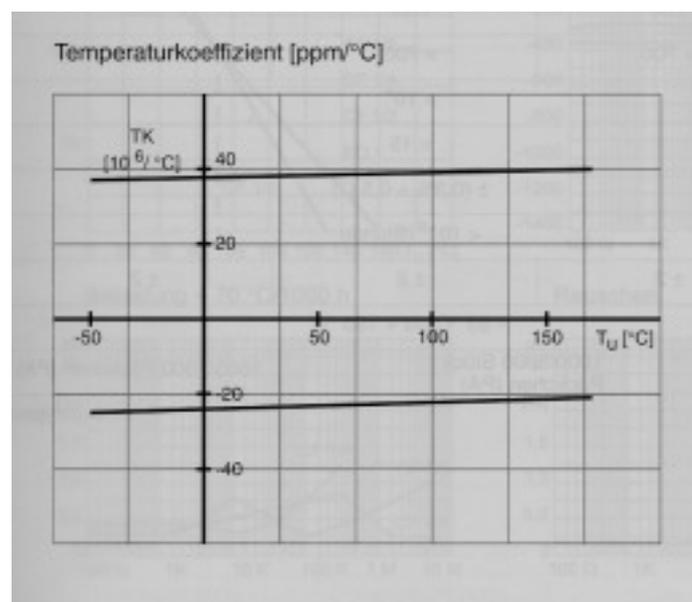


Abb. 12: Typischer Verlauf des TK eines Metallschicht-Widerstandes als Funktion der Temperatur /3/

! Anwendungsbereiche und Ausführungsformen:

- erhältlich im Widerstandsbereich 1Ω bis $10\text{ M}\Omega$, Toleranz $\pm 0,1\%$ bis $\pm 1\%$
- MELF-Serie: ein MELF-Widerstand ist ein zylindrischer SMD-Widerstand mit speziell plattierten Elektroden - verbessertes Widerstandsverhalten beim Löten (geeignet für direkte Flußlötlung).

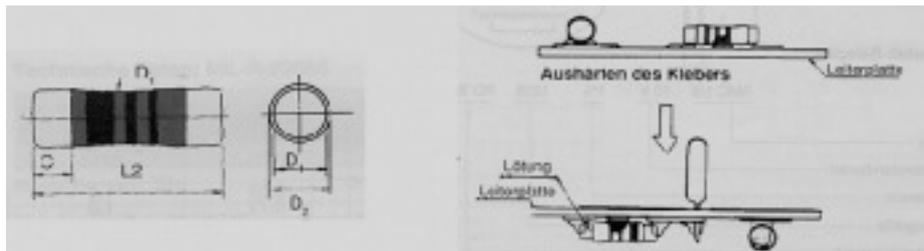


Abb. 13: MELF-Widerstand und dessen Montage auf einer Leiterplatte /3/

- Chip-Widerstand: ein rechteckiger SMD-Widerstand für die Oberflächenmontage auf Leiterplatten geeignet - erlaubt Wellen- und Reflow-Löten.

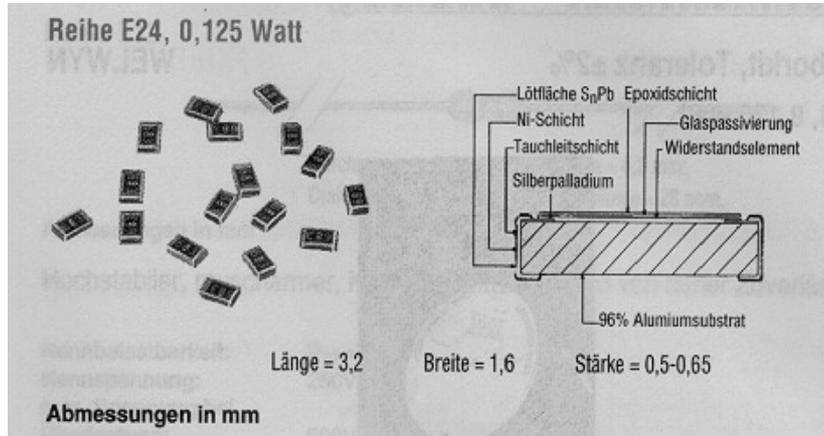


Abb. 14: Chipwiderstand: Ausführungsform und Querschnitt /5/

- preiswerter und sehr häufig verwendeter Typ, vorallem in der SMD-Technik Verwendung in der Unterhaltungselektronik, Datenverarbeitung, Raumfahrt

c) Metalloxid-Widerstände

! Aufbau und physikalische Eigenschaften:

- Material: Zinkdioxid (Zn O_2)
elektrische Leitfähigkeit durch Halbleitung bestimmt, dadurch ist Toleranz ($\pm 5\%$) von Verunreinigungen abhängig
- Oxide sind chemisch außerordentlich resistent und sehr temperaturbeständig
doppelte Verlustleistung als bei Kohlewiderständen möglich

! Anwendungsbereiche und Ausführungsformen:

- erhältlich im Widerstandsbereich 1Ω bis $1\text{ M}\Omega$
- hohe Belastbarkeit bei kleinen Abmessungen (bis 3 Watt), Isolation nicht brennbar, tropenfest
Einsatz in Geräten mit Brandgefahr

d) Metallglasur-Widerstände

! Aufbau und physikalische Eigenschaften:

- Material: Ag-, Pd-, W-Karbid, Tantalnitrid
Sog. "Cermet-" Schicht, d. i. Metallglasurschicht auf Keramik-Substrat in Dickschicht
technik hergestellt und bei Temperaturen $> 1100^\circ\text{C}$ gebrannt
Widerstandsabgleich durch Wendelung
- hohe Spannungsfestigkeit, Toleranz $\pm 0,1$ bis $\pm 5\%$

! Anwendungsbereiche und Ausführungsformen:

- erhältlich im Widerstandsbereich $100\text{k}\Omega$ bis $50\text{G}\Omega$
auch als SMD-Bauteil erhältlich

1.2.2.5 Widerstands-Netzwerke

! Aufbau und physikalische Eigenschaften:

- Hochpräzises Widerstandsnetzwerk/-kaskade in Dünnschichttechnik
Widerstandselement ist ein Metalloxid (RuO_2)
- Toleranz: $\pm 0,1\%$ bis $\pm 5\%$; untereinander $< \pm 0,1\%$
Temperaturkoeffizient: 100 bis 250 ppm/ $^\circ\text{C}$
Belastbarkeit bis 1 Watt

! Anwendungsbereiche und Ausführungsformen:

- erhältlich im Widerstandsbereich 10Ω bis $1\text{ M}\Omega$

Schaltungstyp*	Gemeinsamer Anschluß „G“ einseitig R	Einzel-Anschlüsse RS	Gemeinsamer Anschluß „G“ in der Mitte RC
Zusatz	kein Zusatz	S	C
Schaltbilder	 $R_1 = R_2 = \dots = R_n$ (n = 3 bis 13)	 $R_1 = R_2 = \dots = R_n$ (n = 3 bis 7)	 $R_1 = R_2 = \dots = R_n$ (n = 4 bis 12)
Markierung	 (1) „G“ Markierung (2) Widerstands-Wert (3) Toleranz	 (1) Anzahl der internen Widerstände z. B. 3 5 = 3 Widerstände (2) Widerstands-Wert (3) Toleranz	 (1) „G“ Markierung (2) Widerstands-Wert (3) Toleranz

*andere Schaltungstypen auf Anfrage

Abb. 15: Ausführungsformen von Widerstandsnetzwerken /3/

- SIL (Single-In-Line) und DIL (Dual-In-Line) Gehäuse
Aufteilung der Widerstandswerte: $R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_n$
Schaltungstypen: Gemeinsamer Anschluß und Einzelanschluß
- für automatische Bestückung geeignet; als SMD-Bauteile erhältlich.

1.2.2.6 Lernfragen

- Welche Formen von Kohlewiderständen sind auf dem Markt verbreitet und durch welche Verfahren werden sie hergestellt?
- Durch welches Verfahren werden bei Kohleschichtwiderständen hohe Widerstandswerte erreicht, und welches elektrische Problem muß durch dieses Verfahren in Kauf genommen werden?
- Nennen Sie 6 mögliche Bauformen von Drahtwiderständen.
- Was versteht man unter dem Skineneffekt? Bei welchem Typ von Festwiderständen muß dem Skin-Effekt Rechnung getragen werden?
- Nennen Sie 4 mögliche Formen von Widerstandsschichten bei Metallschichtwiderständen und worin liegen die besonderen Merkmale dieser Metallschichten?
- Welche Aufbaumerkmale weist ein MELF-Widerstand auf?
- Welche Aufbaumerkmale weist ein Widerstands-Netzwerk auf?

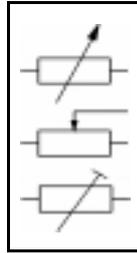
1.3 Einstellbare Widerstände (Potentiometer)

Schaltungssymbole /6/:

veränderbarer Widerstand, allgemein :

Widerstand mit Schleifkontakt:

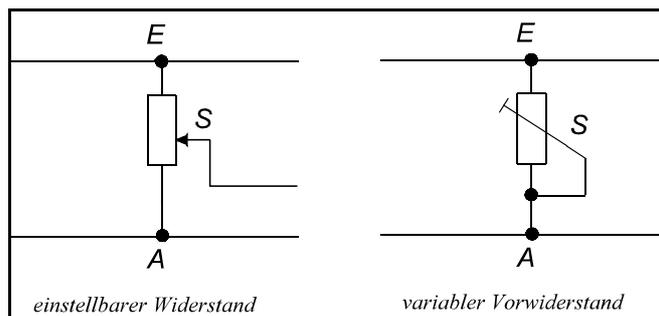
Widerstand, einstellbar:



1.3.1 Aufbau

a) Allgemeines

Ein einstellbarer Widerstand kann als Spannungsteiler oder als variabler Widerstand eingesetzt



werden.

b) Drahtgewickelte Potentiometer:

Ein Keramikträger ist mit einem Widerstandsdraht bewickelt; der Schleifer läuft von Wicklung zu Wicklung; daraus ergibt sich eine endliche Auflösung der Widerstandswertes als Funktion des Schleiferweges, die umso höher ist, je dünner der gewickelte Draht ist.

c) Schichtpotentiometer

Auf einem Keramikträger werden Kohle-, Metall-, Metallglasurschichten oder Schichten aus leitendem Kunststoff aufgebracht; man findet annähernd unendliche Auflösung.

d) Wichtige elektrische Kennwerte

Nennwiderstand, Toleranz, Belastbarkeit, Temperaturkoeffizient, Kurvenverlauf, Auflösung, Linearität, Kontaktwiderstand, Kontaktrauschen, Stromrauschen, Übergangswiderstand des Schleifers.

e) Ausführungsformen



Abb. 16: Ausführungsformen von Potentiometer /3/

- Dreh-, Schiebe-, Spindel-, Trimmer-, Nonien-, Vielgang-, Tandem- Potentiometer
- Motorpotentiometer mit Getriebe und Rutschkupplung (evt. Auch mit Nachlaufverstärker, Brückenschaltung, automatischen Nullabgleich, Koordinatenschreiber)
- Auto-Reset-Potentiometer: kehrt selbsttätig in eingestellte Ausgangsposition zurück
- Funktionspotentiometer: funktionaler Zusammenhang zwischen abgegriffenen Widerstandswert und Schleiferstellung

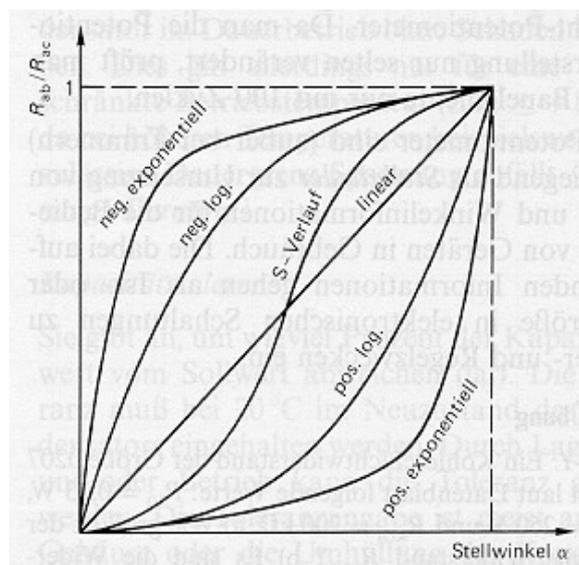
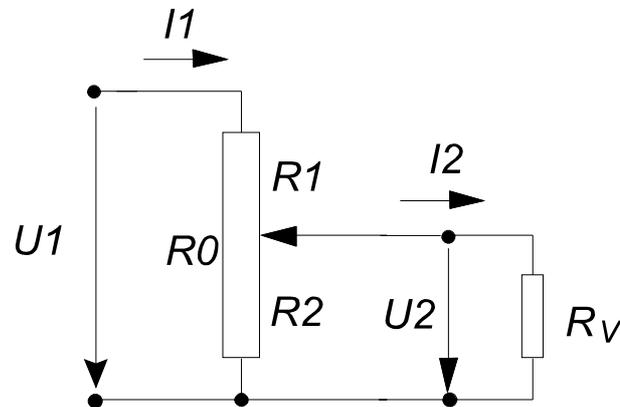


Abb. 17: Widerstandsverläufe als Funktion der Schleiferstellung /2/

1.3.2 Theorie des Potentiometers

a) Potentiometer als Spannungsteiler

Es wird die folgende Schaltung betrachtet:



mit: R_0 = Nennwiderstand des Gesamtwiderstandes
 R_2 = abgegriffener Teilwiderstand
 R_V = Verbraucherwiderstand

Leerlauf:

Für den Leerlauf ($R_V = \infty$) ist der Spannungsteiler unbelastet, und es gilt:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2}{R_0} \quad (1.14)$$

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{R_2}{R_0}$$

Last:

Wird ein Verbraucher mit dem Widerstand R_V angeschlossen, ist das Potentiometer belastet; es ergeben sich zwei Gleichungen für die Teilspannung U_2 und den Strom I_1 :

$$\begin{aligned} \text{I)} \quad U_2 &= U_1 - I_1 \cdot R_1 \\ \text{II)} \quad I_1 &= \frac{U_1}{R_1 + \frac{R_2 \cdot R_V}{R_2 + R_V}} \end{aligned} \quad (1.15)$$

Setzt man zur Vereinfachung:

$$p = \frac{R_0}{R_V} \quad \text{und} \quad n = \frac{R_2}{R_0} \quad (1.16)$$

erhält man für die Teilspannung U_2 und den Strom I_2 durch den Verbraucher folgendes Ergebnis:

$$\begin{aligned} U_2 &= U_1 \cdot \frac{n}{1 + (n - n^2) \cdot p} \\ I_2 &= \frac{U_1}{R_V} \cdot \frac{n}{1 + (n - n^2) \cdot p} \end{aligned} \quad (1.17)$$

Die Teilspannung U_2 als Funktion der Schleiferstellung zeigt die folgende Abbildung:

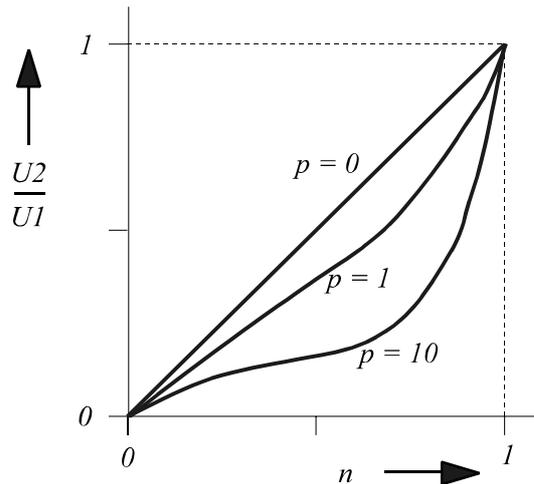


Abb. 18: Belasteter Spannungsteiler

Beachte:

Mit steigendem p wird die Spannungseinstellung stark nichtlinear!
Mit wachsendem n steigt die Teilspannung U_2 stark an!

Definiert man sich den Wirkungsgrad zu:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{U_2 \cdot I_2}{U_1 \cdot I_1} = \\ &= \frac{n^2 \cdot p}{1 + n \cdot p \cdot [2 - n + n \cdot p \cdot (1 - n)]} \end{aligned} \quad (1.18)$$

erkennt man, daß die im Verbraucher umgesetzte Verlustleistung bei großen p -Werten erst am Ende des Schleiferweges stark ansteigt, wie die folgende Abbildung zeigt:

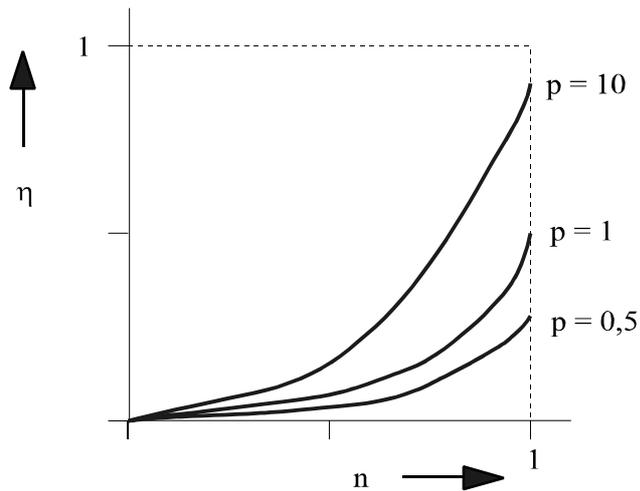


Abb. 19: Wirkungsgrad als Funktion der Schleiferstellung

b) Potentiometer als variabler Vorwiderstand

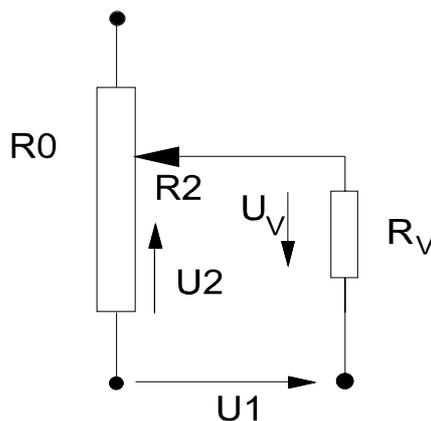


Abb. 20: Potentiometer als Vorwiderstand mit dem variablen Widerstandswert R_2

Strom I_2 , Spannung U_2 und der Wirkungsgrad η lassen sich wie folgt angeben:

$$I_2 = \frac{U_1}{R_V \cdot (1 + n \cdot p)} \quad U_2 = \frac{U_1}{1 + n \cdot p} \quad \eta = \frac{I}{I + n \cdot p} \quad (1.19)$$



Merke:

Die Verwendung eines Potentiometers als Vorwiderstand ist nur in einem begrenzten Bereich möglich; je weiter der Schleifer auf den Anfangspunkt zu verschoben wird, d.h. je kleiner der abgegriffene Widerstands R_2 wird, umso größer wird der Strom durch R_2 ; es besteht die Gefahr, daß der Teilwiderstand überlastet wird und damit die zulässige Verlustleistung überschritten wird.

1.3.3 Lernfragen

- An einem Potentiometer liegt die Spannung U_1 an, am Schleifer wird die Spannung U_2 abgegriffen. Skizzieren Sie den Verlauf U_2/U_1 als Funktion der Schleiferstellung für die 2 Fälle:
 - das Potentiometer ist unbelastet
 - das Potentiometer ist mit einem Lastwiderstand belastet
- Wovon hängt bei einem belasteten Potentiometer der Kurvenverlauf ab? Was ist beim praktischen Betrieb am Ende des Schleiferweges zu berücksichtigen?
- Was versteht man bei einem Potentiometer unter den Angaben: Auflösung, Linearität
- Nennen Sie 5 verschiedenen Bauformen von Potentiometern
- Worin bestehen in technischen Anwendungen die Unterschiede zwischen drahtgewickelten und Schicht-Potentiometern?

1.4 Nichtlineare Widerstände

1.4.1 Allgemeines

Bei nichtlinearen Widerständen besteht ein ausgeprägter nichtlinearer Zusammenhang zwischen dem Strom I und der Spannung U wie die folgende Abbildung zeigt. Daraus folgt, daß der Widerstand R vom betrachteten Arbeitspunkt abhängt.

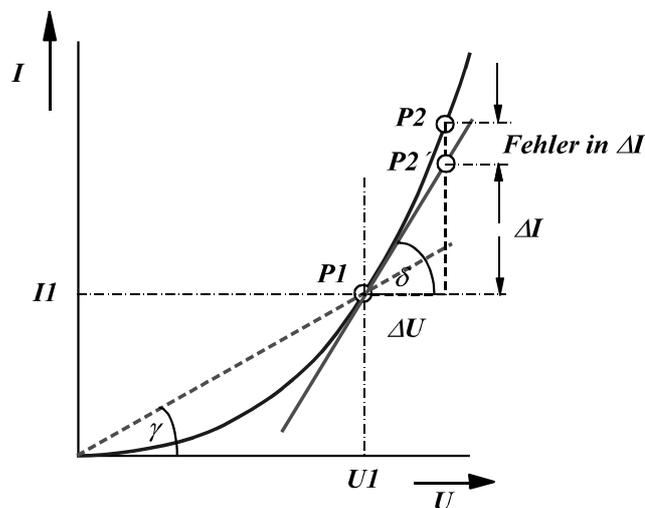


Abb. 21: Beispiel für Berechnung des Ohmschen und differentiellen Widerstandes

Bei nichtlinearen Kennlinien ist zwischen den Ohmschen und differentiellen Widerstand zu unterscheiden.

! Ohmscher Widerstand:

Er wird durch das bekannte Ohmsche Gesetz wiedergegeben:

$$R = \frac{U}{I}$$

Geometrisch betrachtet gibt R die Steigung $\tan\gamma$ der Sekante an einen bestimmten Punkt der Kennlinie wieder, z. B. im Punkt P_1 ist R der Widerstand bei konstanter Spannung U_1 und konstantem Strom I_1 . R ist der Gleichstromwiderstand; er weist in jedem Punkt der Kennlinie einen anderen Wert auf.

! Differentieller Widerstand:

Der differentielle Widerstand r_d wird durch die differentielle Form des Ohmschen Gesetzes beschrieben:

$$r_d = \frac{dU}{dI} = \tan\delta$$

Geometrisch betrachtet gibt r_d die Steigung der Tangente an einem bestimmten Punkt der Kennlinie wieder. Legt man eine Gleichspannung U_1 einen nichtlinearen Widerstand an und überlagert dieser Gleichspannung eine kleine Wechselspannung δU , so ergibt sich zusammen mit dem aus dem Wechselsignal resultierenden Wechselstrom δI der differentielle Widerstand in Arbeitspunkt P , der den Wechselstrom-Widerstand und dem Kleinsignalwiderstand entspricht. Bei einer manuellen Bestimmung des differentiiellen Widerstandes geht man im allgemeinen einen gewissen Spannungsschritt ΔU weiter, liest ΔI aus der Kennlinie ab. Bei dieser Vorgehensweise macht man den in der Abbildung eingezeichneten Fehler.

1.4.2 Varistor (Variable Resistor), VDR (Voltage Dependent Resistor)

! Symbol: 

! Aufbau:

- Material Zinkoxid oder MOV (Metal Oxide Varistor)
früher oft Siliziumcarbid (heute nur noch bei Spezialanwendungen im Bereich hoher Leistungen unter hohen Umgebungstemperaturen verwendet)
- Herstellung Material fein gemahlen, mit Bindemittel versetzt
Masse zu Scheibchen gepreßt; Durchmesser 7 - 40 mm, Dicke 1 - 10 mm
Sinterung erzeugt ein polykristallines Gefüge
Kontaktierung durch Aufdampfen von Sn oder Cu (meist als Paste eingebrannt), bei der isolierten Ausführung mit Epoxidharz umgossen
- Bauformen siehe Abbildung

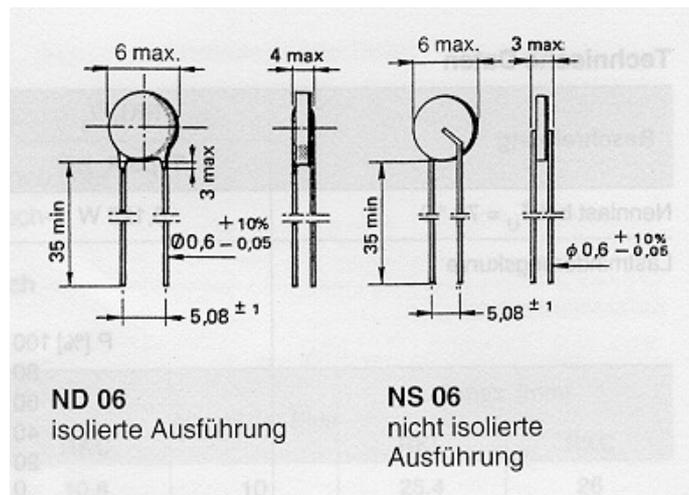


Abb. 22: Typische scheibenförmige Bauform eines VDR /3/

! Elektrische Eigenschaften

Der Widerstandswert sinkt stark mit der angelegten Spannung (z.B. bei 10V ca. 500 k Ω , bei 50 V ca 1 Ω). Bei ZnO-Varistoren ist der Übergang schärfer ausgebildet als bei SiC-Varistoren; ein schärferer Übergang ist für viele Anwendungen günstiger.

Die Strom-Spannungskennlinie ähnelt einer Diodenkennlinie (s. Abbildung); wesentliche Unter-

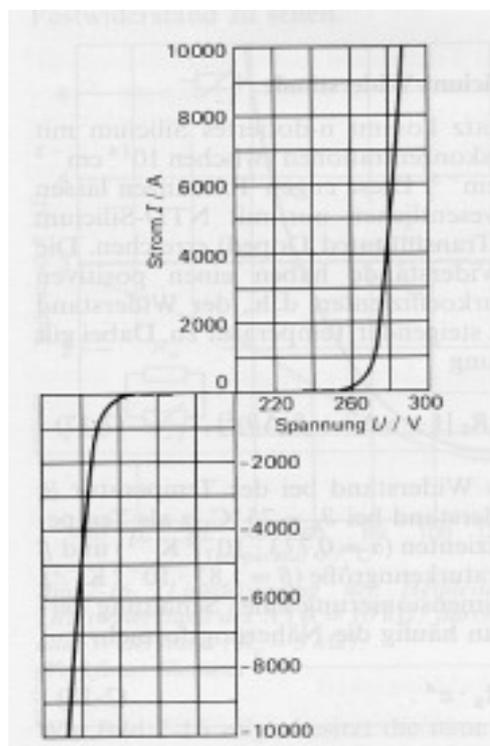


Abb. 23: Typische Strom-Spannungskennlinie eines VDR /2/

scheidungsmerkmale zur Diodenkennlinie sind:

- Kennlinie ist punktsymmetrisch zum Ursprung
- der Stromanstieg erfolgt bei wesentlich höheren Spannungswerten und ist abhängig von der Bauform und dem Material bzw. der Materialzusammensetzung (Mischungsverhältnis)
- toleriert höhere Ströme und Spannungen

Die ZnO-Kristallite sind durch dünne Schichten anderer Metalloxide voneinander getrennt. Die Grenzschichten wirken ähnlich wie pn-Übergänge bei einer Z-Diode; der Spannungsabfall liegt bei ca. 3V pro Sperrschicht. Durch den polykristallinen Aufbau des Elementes ergibt sich eine vielfache Reihen- und Parallelschaltung von zahllosen Mikrovaristoren. Bei theoretisch konstanter Kristallitgröße wird die Kennlinie durch die Dicke des Plättchens bestimmt. Der innere Aufbau legt auch die große Eigenkapazität des Varistors fest, was wiederum die Frequenzabhängigkeit bestimmt.

Die Strom-Spannungs-Kennlinie läßt sich in einem gewissen Bereich durch einen empirischen Ansatz beschreiben:

$$U = C \cdot I^\beta \quad (1.20)$$

Konstante C: wird in Ω angegeben; typischer Wert $15\Omega - 5000\Omega$
abhängig von der Geometrie und vom Material

Konstante β : heißt Regelfaktor; ein Maß für die Nichtlinearität der Kennlinie; dimensionslose Größe
typischer Wert: 0,025 - 0,5
abhängig von der Geometrie und vom Material

C und β werden aus der Kennlinie ermittelt.



Beachte:

C und β sind nur bei Stromdichten im Bereich $0,1 \text{ mA/cm}^2$ bis ca. 1 A/cm^2 näherungsweise konstant; bei kleineren bzw höheren Stromdichten verliert die obige empirische Formel ihre Gültigkeit (s. Abbildung)

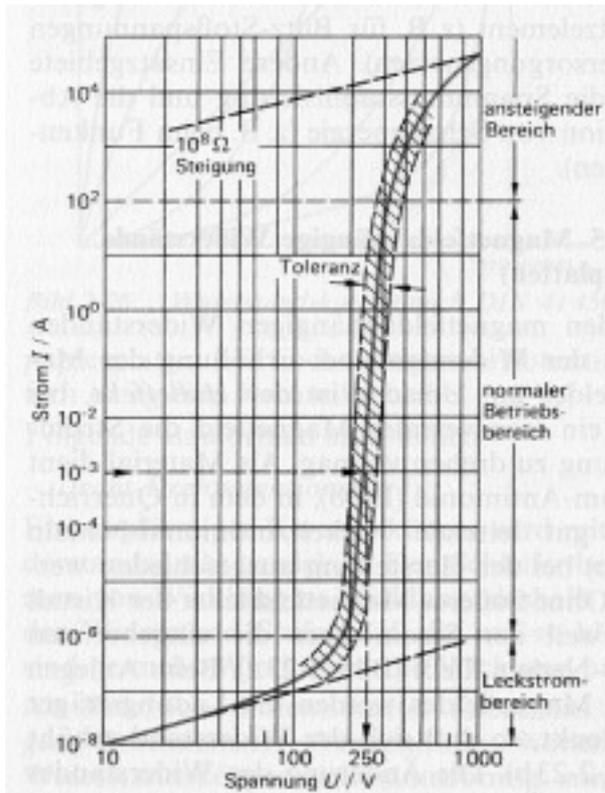


Abb. 24: I-U Kennlinie eines VDR in doppellogarithmischer Darstellung; nur im schraffierten Bereich ist die angegebene Formel näherungsweise gültig und die Konstanten C und β näherungsweise konstant [2/

Weitere elektrische Größen lassen sich aus der angegebenen Formel ableiten.

Ohmscher Widerstand:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{C \cdot I^\beta}{I} = C \cdot I^{\beta-1} \quad (1.21)$$

Differentieller Widerstand:

$$r_d = \frac{dU}{dI} = \beta \cdot C \cdot I^{\beta-1} = \beta \cdot R \quad (1.22)$$

Verlustleistung:

$$P = I \cdot U = I \cdot C \cdot I^\beta = C \cdot I^{\beta+1} \quad (1.23)$$

Eine Übersicht über Strom-, Widerstands- und Leistungskennlinien als Funktion der angelegten Spannung bietet die folgende Abbildung:

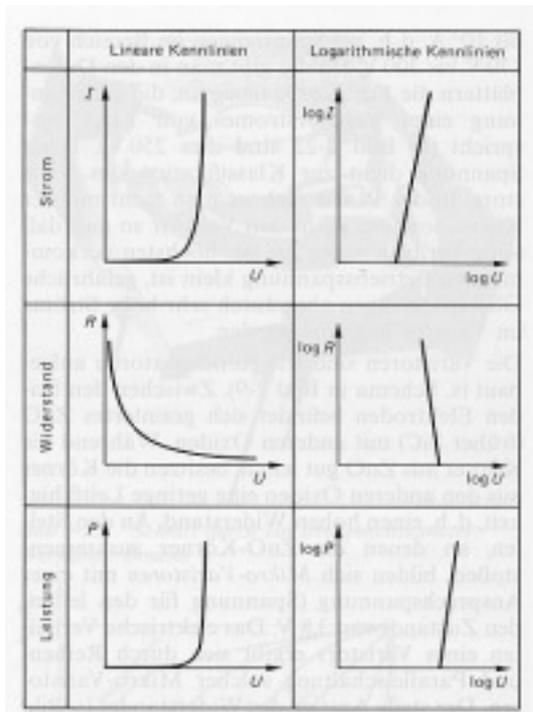


Abb. 25: Strom- Widerstands- und Leistungskennlinien linear und doppellogarithmisch aufgetragen in Abhängigkeit von der Spannung /2/

Eine weitere gebräuchliche Umformung:

$$I = K \cdot U^\alpha \quad \text{mit:} \quad K = \frac{I}{C^{\frac{1}{\beta}}} \quad \text{und} \quad \alpha = \frac{1}{\beta} \quad (1.24)$$

Anwendungen und praktische Hinweise:

- die große Eigenkapazität des VDR beschränkt den Einsatz auf niederfrequente Schaltungen; für Frequenzen > ca. 1 kHz verliert der VDR seine beschriebene elektrische Charakteristik
- durch Parallel- und Serienschaltung eines VDR mit einem linearen Widerstand läßt sich einer anwenderspezifische nichtlineare Kennlinie erzeugen, die durch kein marktübliches Bauelement erreichbar wäre
- durch Serienschaltung von typengleichen VDR läßt sich die Konstante C vergrößern; die Kennlinie läßt sich damit zu höheren Stromwerten verschieben
- durch Parallelschaltung von typengleichen VDR läßt sich prinzipiell die Konstante C verkleinern; eine Parallelschaltung ist jedoch nicht praktikabel:

!Achtung!

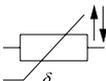
Aufgrund von Bauteilenschwankungen und der damit verbundenen unterschiedlichen Stromaufteilung besteht die Gefahr der Überlastung und damit der Zerstörung einzelner Bauteile.

Außerdem ist eine nennenswerte Verkleinerung der Konstanten C nur mit einer unwirtschaftlich hohen Anzahl von VDR erreichbar.

Von einer Parallelschaltung ist grundsätzlich abzuraten!

- Anwendungen im Bereich der Spannungsbegrenzung /7/ und Spannungsstabilisierung /7/ zum Schutz von empfindlichen Bauteilen (Transistoren, Elektrolytkondensatoren) und zur Dämpfung von Spannungsspitzen (Überspannungen bei Lastausfall); eine Parallelstabilisierung genügt nicht allzu hohen Ansprüchen, wird aber bei Netzspannungen häufig angewendet; bei integrierten Schaltungen werden i.a. Zenerdioden verwendet.
- weitere Anwendungsbereiche:
Funkenlöschung bei Schalten von Induktivitäten (Dämpfung von U_{ind}) /7/
Skalendehnung von Meßgeräten

1.4.3 Heißleiter, NTC-Widerstände

! Symbol: 

! Aufbau:

Material:

Mischkristalle aus verschiedenen Stoffgruppen:

- $\text{Fe}_3 \text{O}_4$ mit Zusätzen wie $\text{Zn}_2 \text{Ti O}_4$ und $\text{Mg Cr}_2 \text{O}_4$
- Ni O oder Co O mit Zusätzen von Lithiumoxid
- $\text{Fe}_2 \text{O}_3$ mit Zusätzen von Ti O_2

Die Zugabe von Zusätzen verbessert die Reproduzierbarkeit und stabilisiert die elektrischen Kenndaten

Herstellung:

Material fein gemahlen, mit Bindemittel versetzt

Masse zu Scheibchen oder Stäbchen gepreßt; Tröpfchen zwischen Pt-Drähte

Sinterung nach der Formgebung

Kontaktierung durch Aufdampfen von Sn oder Cu (meist als Paste eingebrannt)

bei der isolierten Ausführung mit Epoxidharz umgossen

Bauformen:

Miniatur-NTC, auch als SMD

Scheiben- und Stabförmige NTC

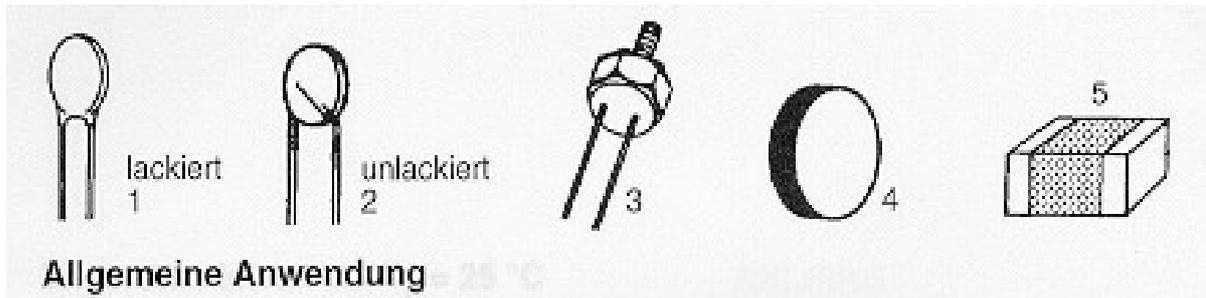


Abb. 27: Typische Bauformen von NTC's /3/

! Elektrische Eigenschaften:

NTC sind charakterisiert durch einen ausgeprägten negativen TK, der im Bereich $-2\%/^{\circ}\text{C}$ und $-6\%/^{\circ}\text{C}$ liegt. Der TK-Wert richtet sich nach Material und Stoffgruppe.

Unterschieden wird zwischen einer Widerstandsänderung des NTC aufgrund der Umgebungstemperatur oder bei stromdurchflossenen NTC aufgrund ihrer Eigenerwärmung

b) Widerstand als Funktion der Umgebungstemperatur

Es wird folgende empirische Ansatz verwendet:

$$R_T = A \cdot \exp\left(\frac{B}{T}\right) \quad (1.25)$$

mit: A = Konstante in Ω
 B = Konstante in K
 T = absolute Temperatur in K

Die Konstanten A und B hängen von der Bauform und der Stoffgruppen ab. Der Nennwiderstand R_N wird auf die Nenntemperatur $T_N = 298\text{K}$ bezogen. B wird aus der Steigung der Kennlinie ermittelt, wobei neben dem Widerstand bei Nenntemperatur noch ein zweiter Wert bei der Temperatur $T = 358\text{K}$ herangezogen wird.

Typische B-Werte: 2000K - 6000K

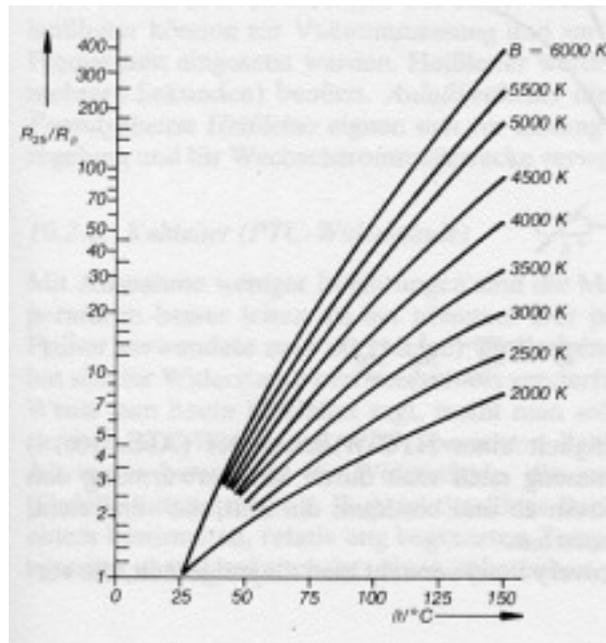


Abb. 28: Auf den Nennwiderstand normierter Widerstand als Funktion der Temperatur mit der Materialkonstanten B als Parameter /2/

Differenziert man obige Gleichung nach T, erhält man den Temperaturkoeffizienten α :

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} = - \frac{B}{T^2} \quad (1.26)$$

c) Spannung-Strom-Kennlinie

Befindet sich der stromdurchflossene NTC in thermischen Gleichgewicht mit der Umgebungstemperatur, bleibt die eigene Temperatur konstant. Es ergibt sich die in der U-I-Kennlinie dargestellte Kennlinie. Hierin bedeuten die einzelnen Teilbereiche:

- Bereich ❶ : die zugeführte Leistung ist sehr klein ($< 10 \text{ mW}$); eine Eigenerwärmung ist vernachlässigbar
- Bereich ❷ : es findet eine Erwärmung des NTC statt; der Widerstand nimmt ab; das Maximum richtet sich nach der Stoffgruppe der Umgebungstemperatur und der Oberfläche
- Bereich ❸ : liegt außerhalb des normalen Arbeitsbereiches des NTC; starke Erwärmung setzt zusätzliche Ladungsträger frei; der Strom steigt stark an bei annähernd konstanter Spannung

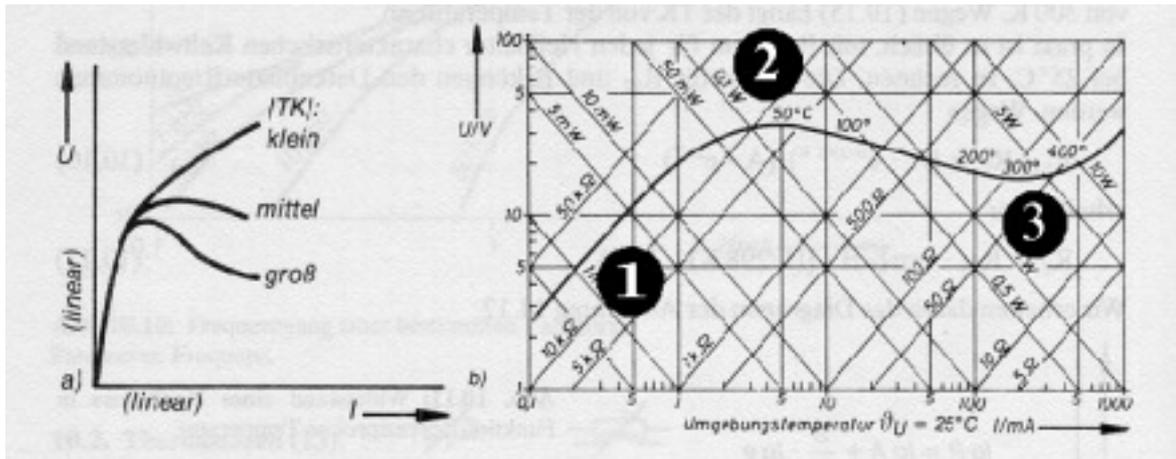


Abb. 29: Spannung-Strom-Kennlinie bei konstanter Umgebungstemperatur T_U ; links qualitativer Verlauf für verschiedene TK-Werte /I/

Im thermischen Gleichgewicht ist die im NTC umgesetzte Leistung P gegeben durch:

$$P = C \cdot (T - T_U) \quad (1.27)$$

C heißt Erwärmungskonstante und besitzt die Dimension $W/^\circ C$:

Definition:

Die Erwärmungszeitkonstante gibt die im NTC umgesetzte Leistung an, die die Temperatur des NTC bei einer Umgebungstemperatur von $25^\circ C$ (298K) und ruhender Luft um $1^\circ C$ (1K) erwärmt

Zusammen mit der Gleichung für den Widerstand berechnen sich Strom I und Spannung U :

$$U = \sqrt{C \cdot (T - T_U) \cdot A \cdot \exp\left(\frac{B}{T}\right)}$$

$$I = \sqrt{\frac{C \cdot (T - T_U)}{A \cdot \exp\left(\frac{B}{T}\right)}} \quad (1.28)$$

d) Abkühlverhalten

Das Abkühlverhalten und damit der zeitliche Anstieg des Widerstandes eines NTC richtet sich stark nach seiner Bauform: kleinere NTC kühlen sich schneller ab als großvolumigere Bauteile. Dieses Verhalten ist in den Abkühlkurven wiedergegeben.

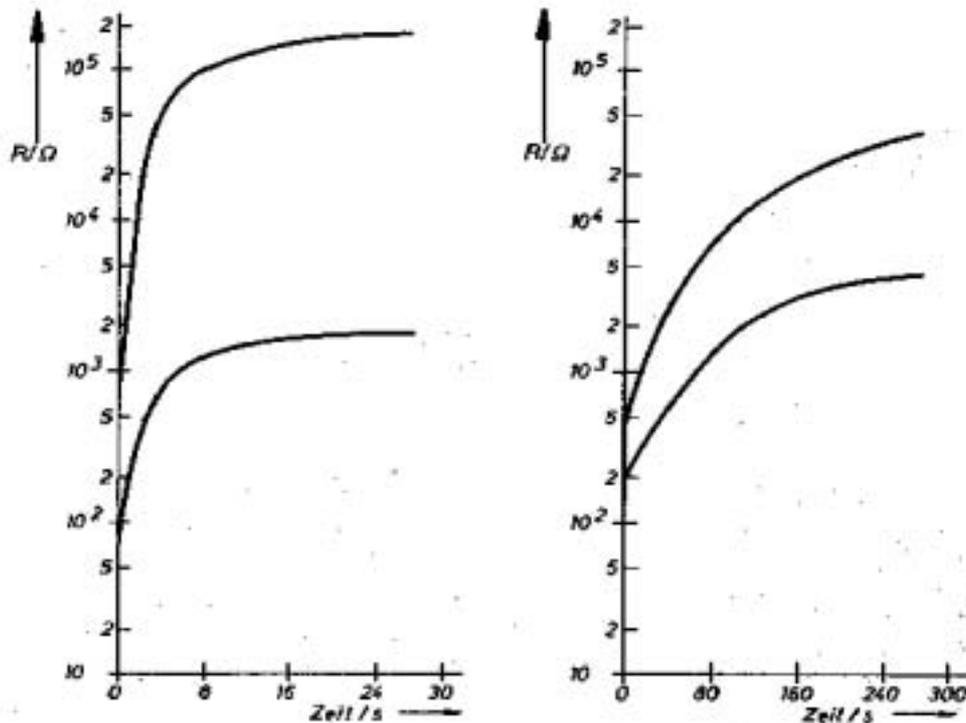


Abb. 30: Abkühlkurven für einen Mini-NTC (links) und einen stabförmigen NTC (rechts) /1/

Das Abkühlverhalten wird durch die sog. “Zeitkonstante der Abkühlgeschwindigkeit” definiert:

Definition:

Durch Stromerwärmung wird $0,5 \times R_N$ eingestellt; nach Abschalten des Stromes wird die Zeit t gemessen, bis der Widerstand R um 63% zugenommen hat.

Es bestehen (vor allem im angelsächsischen Bereich) andere Definitionen des Abkühlverhaltens, z.B. die sog. “Recovery Time”:

der NTC wird bei P_{\max} betrieben und anschließend die Zeit gemessen, bis der Widerstand $0,5 \times R_N$ beträgt

! Anwendungen und praktische Hinweise:

- Temperaturmessung
Meßbereich : -80°C bis $+300^\circ\text{C}$
NTC haben hohe Empfindlichkeit; Mini-NTC zeigen eine sehr geringe Trägheit bezüglich Temperaturänderungen
- Unterdrückung von hohen Einschaltströmen /7/
- Gas-Analyse, Strömungsmessung
ausgenützt wird die unterschiedlichen Wärmeeigenschaften des umgebenden Mediums bzw. das zeitliche Abkühlverhalten des NTC

- wie beim VDR läßt sich durch eine Serien- oder Parallelschaltung des NTC mit einem linearen Widerstand eine neue Kennlinie erzeugen. Die neue Kennlinie weist dann auch den TK des verwendeten NTC auf (s. Abbildung).

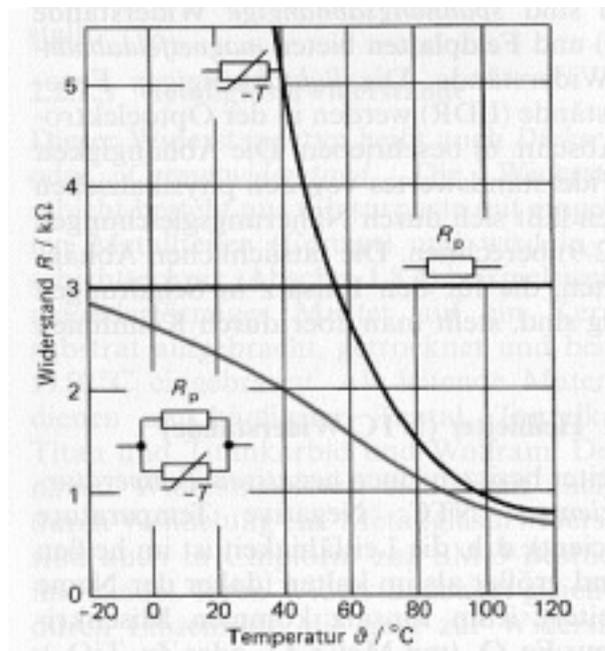


Abb. 31: Durch Parallel- bzw. Serienschaltung mit einem linearen Widerstand erzeugte linearisierte Kennlinie /2/

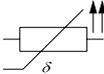
- Alterungsvorgänge rufen große Schwankungen in den elektrischen Eigenschaften hervor, die durch Diffusionsvorgänge in dem polykristallinen Material bedingt sind
- in noch strengerer Konsequenz als beim VDR gilt:

!Achtung!

Aufgrund von Bauteilsschwankungen und der damit verbundenen unterschiedlichen Stromaufteilung besteht bei Parallelschaltung mehrere NTC die Gefahr der Überlastung einzelner Bauteile. Der niederohmiger NTC übernimmt den größeren Strom, erwärmt sich schneller als die anderen und wird noch niederohmiger, was schließlich zur Zerstörung des NTC führt.

!Niemals NTC's parallel schalten!

1.4.4 Kaltleiter, PTC (Positive Temperature Coefficient)

! Symbol: 

! Aufbau:

Material: halbleitende Ferroelektrika z.B. Titanatkeramik wie Barium- (Ba Ti O₃) oder Strontium-Titanat (Sr Ti O₃)



Beachte:

i.a. ist jeder Metall-Draht ein Kaltleiter! Simple gesprochen ist ein Wolfram-Draht ein PTC

Anmerkung /7/, /8/:

In Analogie zu den Ferromagnetika, die bekanntlich eine große und von der magnetischen Feldstärke abhängige Permeabilität aufweisen, besitzen die Ferroelektrika eine große von der elektrischen Feldstärke abhängige Dielektrizitätskonstante ϵ - bei Bariumtitanat ist $\epsilon_r \sim 5000$. Bei niedrigen Temperaturen sind Ferroelektrika spontan polarisiert. Wird ein solches Material durch Dotierung leitfähig gemacht und in polykristalliner Form zu einem Widerstand gesintert, so bilden sich bei Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen den mikroskopisch kleinen Kristalliten Sperrschichten. Diese sind nur schwach ausgebildet, da der hohe Polarisationsgrad eine Ladungskompensation an den Korngrenzen im polykristallinen Material bewirkt.

Bei Raumtemperatur ist der PTC relativ niederohmig; wegen der großen Dielektrizitätskonstanten gilt nach dem Coulombschen Gesetz, daß die abstoßende Kraft zwischen gleichnamigen Ladungen $F \sim 1/\epsilon$ ist, d.h. die abstoßenden Kräfte wirken sich relativ schwach aus. Bei geringfügigem Temperaturanstieg nehmen die Gitterschwingungen zu, an denen in besonderem Maße das locker gebundenen Ti^{4+} -Atom teilnimmt. Es werden mehr Ladungsträger freigesetzt, der Polarisationsgrad (damit ϵ) nimmt weiter zu, so daß der PTC noch etwas niederohmiger wird, ein Verhalten, das von Halbleitern bekannt ist. Ein charakteristisches Merkmal von vielen PTC's ist, daß sie im unteren Temperaturbereich einen negativen TK aufweisen, sich also wie ein NTC verhalten.

Oberhalb einer gewissen Temperatur - wieder in Analogie zu den Ferromagnetika - der sog. Curie-Temperatur (von -50°C bis $+250^\circ\text{C}$ je nach Dotierungsgrad einstellbar) verliert das Material seine Polarisierbarkeit und damit sinkt die Dielektrizitätskonstante stark ab, die abstoßenden Coulomb-Kräfte an den Korngrenzen nehmen stark zu, da nun die Sperrschichten zwischen den Korngrenzen verstärkt zur Wirkung kommen. Die Folge ist ein starker Anstieg des Widerstandes mit steigender Temperatur, der dem um Größenordnungen kleineren negativen Widerstandsverhalten überlagert ist. Man erkennt eine weitere Eigenart der Ferroelektrika, daß die Dielektrizitätskonstante ϵ_r oberhalb der Curie-Temperatur eine starke Temperaturabhängigkeit aufweist.

Bei hohen Temperaturen werden die Sperrschichten wie beim Halbleiter von thermisch generierten Ladungsträgern (stammen vom Sauerstoff) überflutet, so daß der Anstieg des Widerstandes endet und sogar ein Abfall zu beobachten ist. Dieses Verhalten begrenzt den Temperaturbereich, in dem PTC's eingesetzt werden können. Das sonderbare elektrische Verhalten von PTC's erklärt sich aus dem Zusammenspiel von Potentialbarrieren mit einer ausgeprägten Polarisation.

Potentialbarrieren sind Raumladungsgebiete mit gespeicherten Ladungen, die parallel zum Widerstand eine Kapazität haben, die hohe Werte annehmen kann. Die Impedanz ist stark frequenzabhängig, so daß das PTC-Verhalten auch noch einen starken Gang mit der Frequenz zeigt. Ab einer gewissen Frequenz verliert der PTC vollständig sein charakteristisches Verhalten.

- Herstellung und Ausführungsformen:
Scheiben- und Stabformen wie NTC

! Elektrische Eigenschaften

Eine sinnvolle mathematische Beschreibung sowohl der Widerstands- als auch der Strom-/Spannungs-Kennlinie eines PTC läßt sich nicht angeben.

b) Die Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur

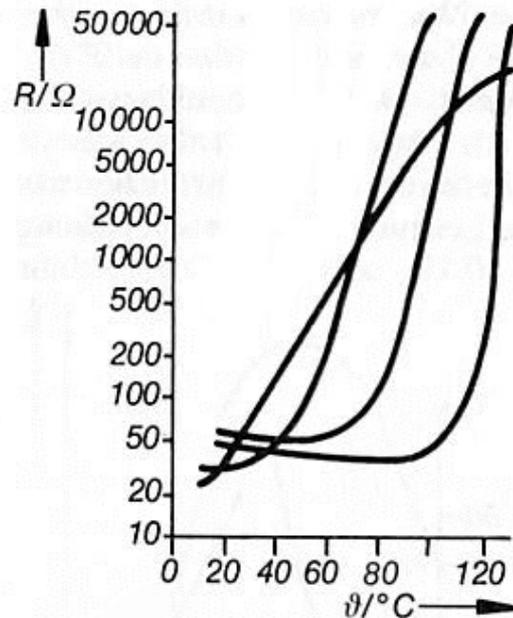


Abb. 32: Widerstand als Funktion der Temperatur für verschiedene Typen von PTC /1/

Im allgemeinen weist die Kennlinie ein Minimum $R_{\min} = R_A$ bei der Temperatur ϑ_A auf; hier beginnt der Arbeitsbereich mit einem stark positiven TK, der zwischen $+7\%/^\circ\text{C}$ und $+70\%/^\circ\text{C}$ liegt. R_A heißt oft auch Anfangswiderstand oder Kaltwiderstand. (In manchen Datenbüchern wird der Kaltwiderstand der Einfachheit halber als der Wert bei $\vartheta = 25^\circ\text{C}$ bezeichnet, z.B. in /1/)

Man definiert die sog. Nenntemperatur ϑ_N , der der Widerstand auf den doppelten Werte von R_{\min} angestiegen ist. Der Punkt heißt auch Umschlagpunkt

Das Ende des steilen Anstieges des Widerstandes ist mit R_E bei der Temperatur ϑ_E erreicht; ab hier nimmt der TK ab und kann negativ werden.

Genannte Kenngrößen sind in der folgenden Abbildung eingezeichnet.

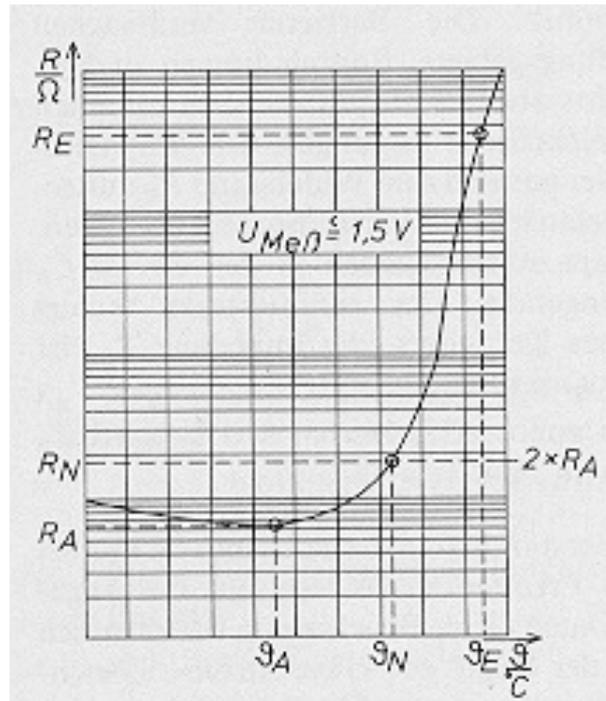


Abb. 33: Widerstand R als Funktion der Temperatur θ mit Angabe spezifischer Kenngrößen nach /7/

Das PTC-Verhalten nimmt mit steigender Frequenz ab

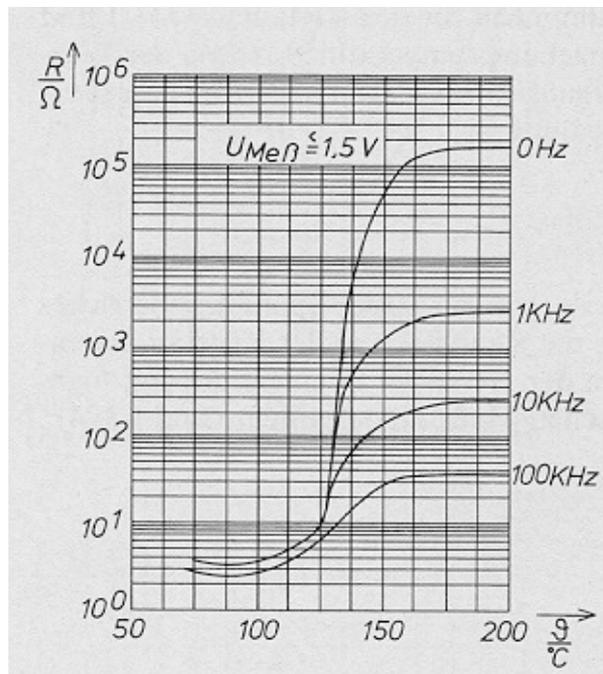


Abb. 34: Widerstand als Funktion der Temperatur θ mit der Frequenz als Parameter /7/

c) Strom-Spannungskennlinie

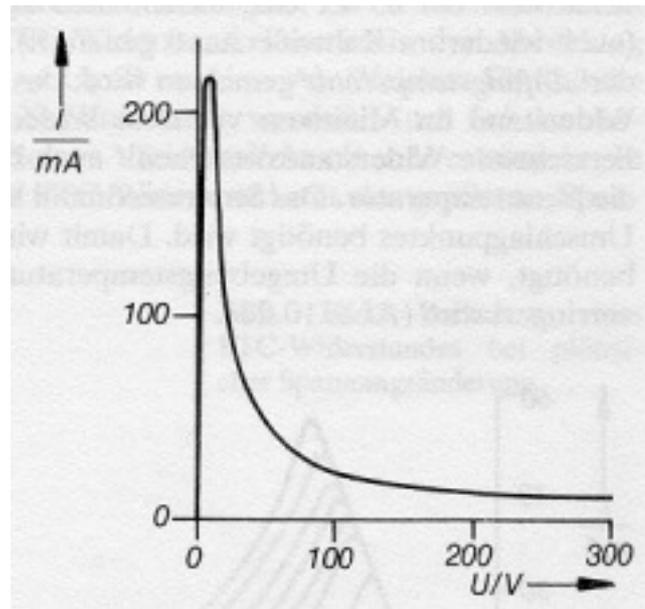


Abb. 35: Typische Strom-Spannungskennlinie eines PTC /1/

Die Kennlinie verdeutlicht die strombegrenzenden Eigenschaften des PTC; bei kleinen Spannungen verhält sich der PTC wie ein Ohmscher Widerstand. Mit wachsender Spannung bildet sich ein ausgeprägtes Strommaximum, das wegen der Stromerwärmung den Umschlagpunkt markiert. Mit weiter wachsender Spannung fällt der Strom näherungsweise hyperbolisch.

Das Strommaximum hängt von der Leistung ab, die zum Erreichen des Umschlagpunktes erforderlich ist; je höher die Umgebungstemperatur umso niedriger liegt das Strommaximum wie die folgende Abbildung zeigt.

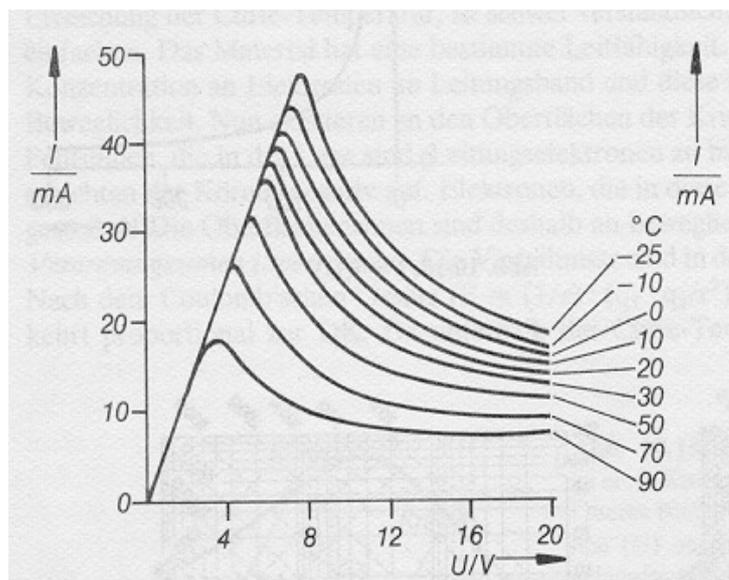


Abb. 36: Strom-Spannungskennlinie eines PTC mit der Umgebungstemperatur als Parameter /1/

d) Aufheizzeit

Oft wird in Datenbüchern die Aufheizzeit t_s (manchmal auch Schaltzeit) abgegeben. Sie ist definiert als die Zeit, während der der Strom auf die Hälfte seines Anfangswertes abgesunken ist.

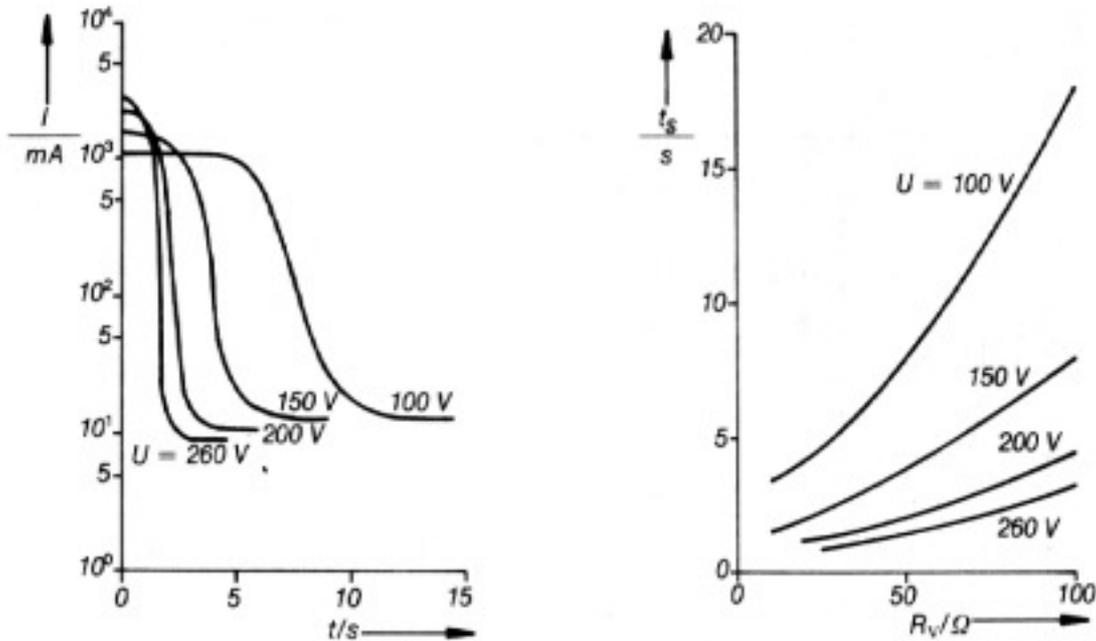


Abb. 37: Strom als Funktion der Aufheizzeit t_s (links); Aufheizzeit als Funktion des Vorwiderstandes R_V ; für beide Graphen ist die angelegte Spannung der Parameter U

! Anwendungen /7/, /8/:

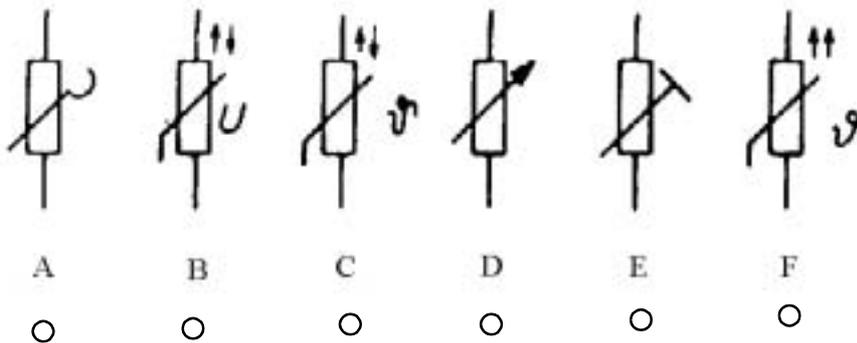
- Strombegrenzung, Überstromsicherung und Stromstabilisierung
- Temperaturfühler, Flüssigkeits-Niveau-Fühler

1.4.5 Lernfragen

- a) Was versteht man unter einem Varistor? Geben Sie das Schaltungssymbol an und skizzieren Sie die I/U - Kennlinie.
- b) Durch welche schaltungstechnischen Maßnahmen läßt sich bei einem Varistor C vergrößern oder verkleinern? Welche elektrischen Probleme können dabei entstehen?
- c) Was gibt der differentielle Widerstand einer nichtlinearen Kennlinie an?
- d) Was ist ein NTC-Widerstand, und durch welche elektrischen Größen wird er beschrieben? In welchen Bereichen bewegen sich diese Größen (Größenordnung angeben)?
- e) Skizzieren Sie qualitativ den Strom-Spannungsverlauf $U = f(I)$ eines NTC-Widerstandes für

einen kleinen, mittleren, und großen TK-Wert.

- f) Was versteht man unter der Zeitkonstanten der Abkühlgeschwindigkeit eines NTC? Durch welche technischen Maßnahmen läßt sich diese Zeitkonstante variieren?
- g) Nennen Sie 2 wichtige Anwendungsgebiete von NTC's.
- h) Was ist bei der Verschaltung mehrerer NTC's zu berücksichtigen, die durch Strom erwärmt werden sollen?
- i) Was ist ein PTC-Widerstand? In welcher Größenordnung liegt der TK-Wert?
- j) Skizzieren Sie die Kennlinie eines PTC, tragen Sie eine Lastgerade ein und beschreiben den Verlauf des Arbeitspunktes bei Steigerung und Abfall der Betriebsspannung.
- k) Welches der 6 angegebenen Schaltzeichen stellt einen PTC dar? Kreuzen Sie die richtige Antwort an.



- l) Aus welchem Material bestehen im allgemeinen PTC's und durch welche charakteristischen elektrischen Eigenschaften zeigt dieses Material?
- m) Nennen Sie typische Anwendungen für PTC's.
- n) Welche besonderen elektrischen Eigenschaften weist ferroelektrischen Material auf? Nennen Sie ein für Bauelemente häufig eingesetztes ferroelektrisches Material?

1.5 Übungen

1.5.1 Rechenaufgaben zu Kapitel 1

Aufgabe 1:

Bei einem VDR wurden 2 Wertepaare gemessen:

$$U_1 = 473,3 \text{ V} \qquad I_1 = 100 \text{ mA}$$

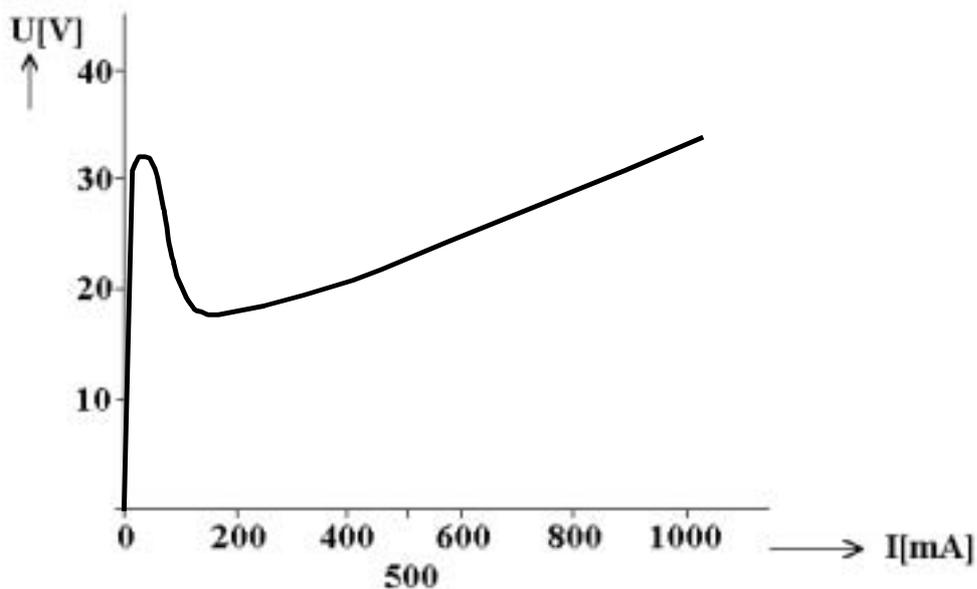
$$U_2 = 200 \text{ V} \qquad I_2 = 1,35 \text{ mA}$$

Wie groß sind die Konstanten β und C ?

Ergebnis: $\beta = 0,2$; $C = 750 \Omega$

Aufgabe 2:

Gegeben sind die Kennlinien eines NTC. Der Meßkreis habe einen Widerstand von 40Ω , die Reihenschaltung bestehe somit aus einem Heißleiter und einer variablen Spannungsquelle mit konstantem Innenwiderstand $R_i = R_v = 40 \Omega$.



- Man zeichne in das Diagramm die Widerstandsgerade ein für $U = 20 \text{ V}$.
- Man beschreibe, wie sich der Strom ändert, wenn die Spannung von 0 V an stetig erhöht wird.
- Man beschreibe, wie sich der Strom ändert, wenn sich die Spannung von 40 V an stetig erniedrigt.

d.) Welchen Widerstand müsste der Vorwiderstand mindestens besitzen, damit kein Stromsprung erfolgt?

Ergebnis: a) - c) siehe Lösungsblatt
d) $R_{\min} > \sim 250\Omega$

Aufgabe 3:

Gegeben seien die Leistung in einem NTC: $P_{\text{NTC}} = C (T - T_U)$ mit $P_{\text{NTC}} = U^2/R_T$, die Umgebungstemperatur: $T_U = 298 \text{ K}$ und die Konstante $B = 6000 \text{ K}$.

Bei welcher absoluten Temperatur wird die maximale Spannung U_{MAX} erreicht, und ab welchen B-Werten tritt kein Spannungsmaximum mehr auf?

Ergebnis: $T = 314\text{K}$
 $B < 1192\text{K}$

Aufgabe 4:

a.) Wieviele VDR's sind parallel zu schalten, um bei einem Regelfaktor $\beta = 0,4$ und $\beta = 0,2$ die Konstante C zu halbieren?

b.) Für einen VDR sind folgende Kenndaten gegeben: $C = 500 \Omega$ und $\beta = 0,4$. Wie groß sind Ohmscher Widerstand R, differentieller Widerstand r_d und Verlustleistung P bei einer Stromstärke von 500 mA?

Ergebnis: a.) $\beta = 0,4:$ $n \gg 6$
 $\beta = 0,2:$ $n \gg 32$
b.) $R \approx 758 \Omega$; $r_d \approx 303 \Omega$; $P = 189,5 \text{ W}$

Aufgabe 5:

Wie groß ist der TK, wenn ein Widerstand von $10 \text{ M}\Omega$ bei einer Temperaturerhöhung von 2°C seinen Widerstandswert um $2 \text{ k}\Omega$ erhöht?

Ergebnis: $\text{TK} = 100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$

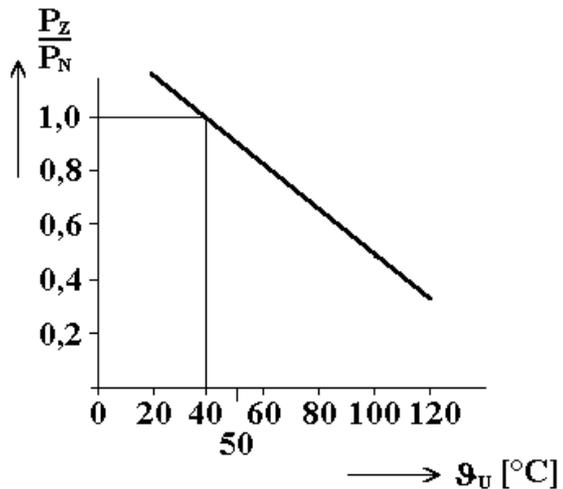
Aufgabe 6:

Man kann den negativen TK von Konstantan von -30 ppm/K dazu benützen, den positiven TK von Kupfer von $+4300 \text{ ppm/K}$ auszugleichen. Es betrage der Widerstand einer Kupferspule eines Instrumentes 100Ω . Ihr wird ein Konstantanwiderstand von $19,9 \text{ k}\Omega$ dazugeschaltet. Wie groß ist der TK der Serienschaltung?

Ergebnis: $\text{TK}_{\text{ges}} = -8,35 \text{ ppm/K}$

Aufgabe 7:

- a.) Ein Massewiderstand mit $R_0 = 10 \text{ k}\Omega$ bei $\vartheta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ weist laut Datenblatt bei Temperaturerhöhung auf $\vartheta = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ eine annähernd lineare relative Widerstandsänderung $\Delta R/R_0$ um 4 % auf. Berechnen Sie den Temperaturkoeffizienten TK dieses Widerstandes.
- b.) Um wieviel Prozent ändert sich durch diese Temperaturerhöhung die im Widerstand umgesetzte Leistung P , wenn die Spannung am Widerstand konstant bleibt.
- c.) Dem Datenblatt ist die nebenstehende Lastminderungskurve zu entnehmen. Um wieviel ist demnach die zulässige Leistung P_Z bei einer Umgebungstemperatur $\vartheta_U = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ zu reduzieren?



- d.) Ein mit Kupferdraht gewickelter Drahtwiderstand habe einen Temperaturkoeffizienten $\text{TK} = +4300 \text{ ppm/K}$. Welcher Kupfer-Drahtwiderstand ist zu wählen, um in Reihenschaltung mit dem obigen Massewiderstand bei einer Umgebungstemperatur $\vartheta_U = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ die vom Massewiderstand verursachte Widerstandsänderung zu kompensieren?

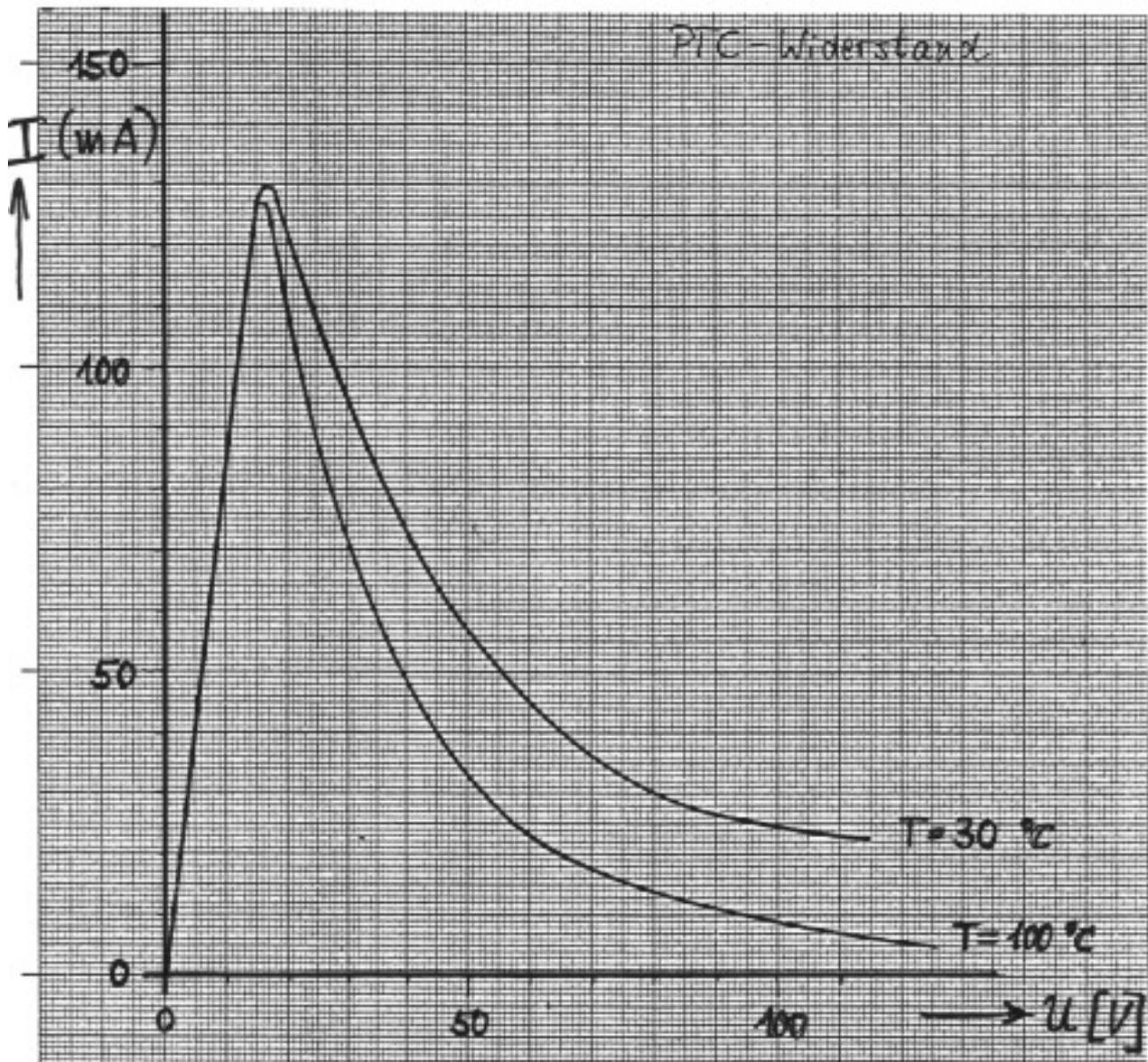
Ergebnis: a.) $\text{TK} = -500 \text{ ppm}$ b.) $\Delta P/P \gg 4,2 \%$
 c.) um 50 % d.) $R_0(\text{Cu}) = 1,163 \text{ k}\Omega$

Aufgabe 8:

Ein PTC-Widerstand wird als Überlastschutz in Reihe mit einem Verbraucher geschaltet. Der Verbraucher besitzt einen temperaturabhängigen Innenwiderstand R_V mit ohmschen Verhalten, der bei $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ $1 \text{ k}\Omega$ beträgt. Die Betriebsspannung ist konstant $U_B = 100 \text{ V}$.

- a.) Tragen Sie in die gegebene Kennlinie des PTC -Widerstandes die Kennlinie des Verbraucherwiderstandes R_V so ein, daß Sie den Arbeitspunkt AP1 und die Teilspannungen $U(R_V)$ und $U(\text{PTC})$ ablesen können. Markieren Sie AP1, $U(R_V)$, $U(\text{PTC})$ und U_B . Wie groß ist die im Verbraucher umgesetzte Verlustleistung P_V bei $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$?

- b.) Durch Erhöhung der Betriebstemperatur erwärmen sich der Verbraucher und der PTC-Widerstand. R_V verringert sich mit steigender Temperatur. Bei welchem Arbeitspunkt AP2 wird die maximale Verlustleistung $P_{V,MAX}$ erreicht, und wie groß ist $P_{V,MAX}$?
- c.) Bei $T = 100\text{ °C}$ ist R_V auf $500\ \Omega$ abgesunken. Die Kennlinien des PTC-Widerstandes verändern sich kontinuierlich zwischen den angegebenen Kennlinien für $T = 30\text{ °C}$ und $T = 100\text{ °C}$. Es stellt sich AP3 ein. Beschreiben Sie den Verlauf von AP, $U(R_V)$, $U(\text{PTC})$ und I für den gesamten Temperaturbereich. Wie groß sind P_V und $R(\text{PTC})$ in AP3?



- Ergebnis:
- a) $P_V = 8,1\text{ W}$
 - b) $P_{V,max} = 10,8\text{ W}$
 - c) $P_V = 50\text{ mW}$ und $R_{\text{PTC}} = 9,5\text{ k}\Omega$

Aufgabe 9:

a.) An einem Varistor wurden folgende Strom/Spannungswertepaare gemessen:

I[mA]	15	20	30	50	70	100	200	500	1000
U[V]	1,8	3	4,5	6	6,85	7,96	10,5	15.1	20

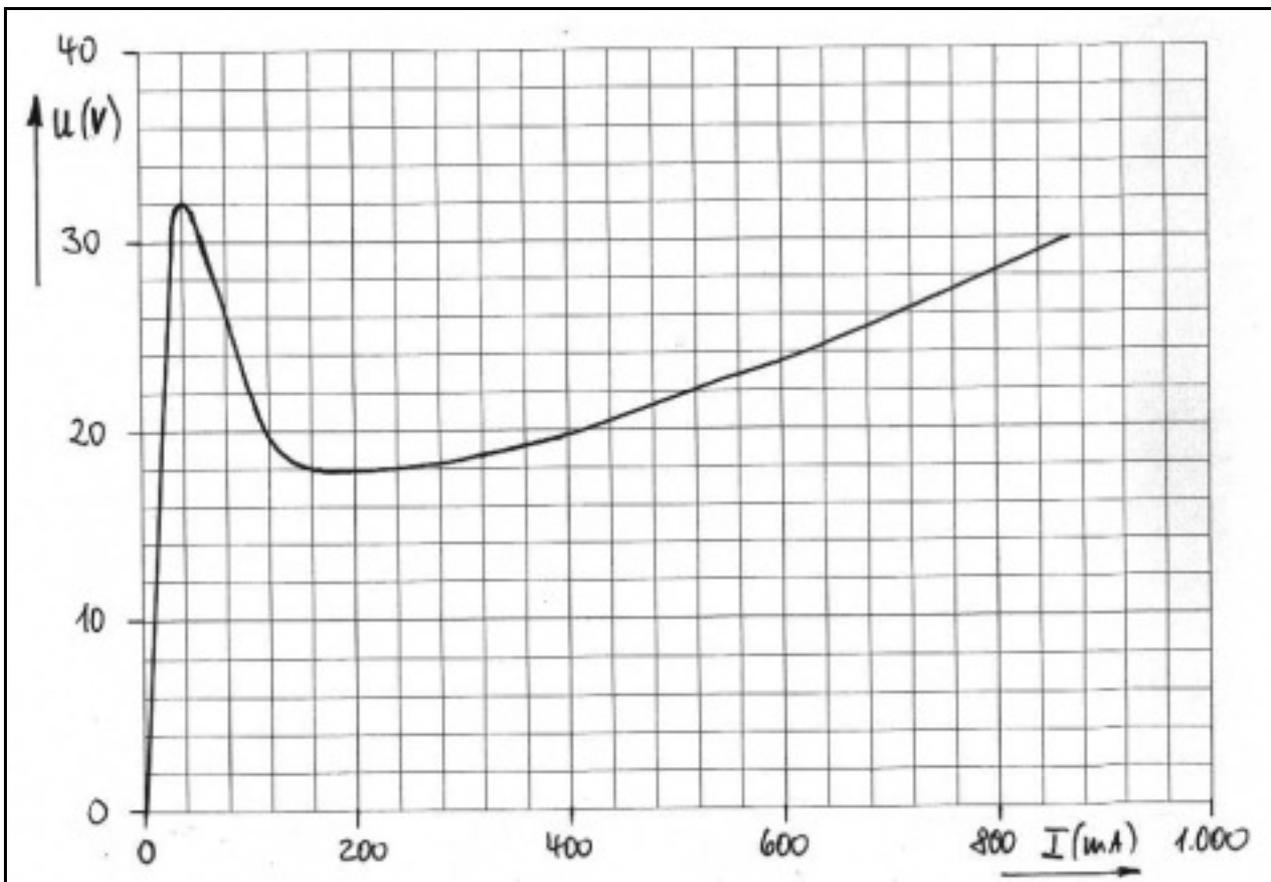
Die Meßwerte sind in ein logarithmisches Koordinatensystem einzutragen; der Graph $U = f(I)$ ist zu zeichnen.

b.) Berechnen Sie den Regelfaktor und die Konstante C des Varistors. In welchem Strombereich ist C nicht mehr konstant?

c.) Berechnen Sie den ohmschen Widerstand R und den differentiellen Widerstand r_d bei einem Stromwert $I = 100$ mA. Worin besteht der Unterschied zwischen R und r_d ?

Ergebnis: a) sh doppellog. Diagramm
 b) $\beta = 0,4$ und $C = 20\Omega$ c) $r_d = 32\Omega$

Aufgabe 10: s. auch Aufgabe 2!



Gegeben ist die Kennlinie eines NTC-Widerstandes auf der folgenden Seite. Der Schaltkreis besteht aus einer Spannungsquelle mit einem Innenwiderstand $R_i = 40 \Omega$ und dem NTC.

- a) Tragen Sie in das Diagramm den Arbeitspunkt mit der Arbeitsgeraden ein, wenn die Spannungsquelle 20 V liefert. Lesen Sie aus dem Diagramm Strom I und die Spannung U ab, die am NTC abfällt
- b) Skizzieren Sie in dem Diagramm unter Zuhilfenahme der Arbeitsgeraden den Gang des Arbeitspunktes, wenn die Spannung zunächst auf 40V erhöht, anschließend wieder auf 20V reduziert wird. Markieren Sie die herausragenden Arbeitspunkte. In welchem Arbeitspunkt fällt die größte Spannung $U_{\text{NTC,max}}$ am NTC ab, in welchem Arbeitspunkt fließt der größte Strom $I_{\text{NTC,max}}$ durch den NTC?
- c) Wie groß müßte ein zusätzlicher Ohmscher Widerstand im Schaltkreis gewählt werden, damit bei obigen Spannungsbereich keine Stromsprünge auftreten?

1.5.2 Lösungen zu den Rechenaufgaben von Kapitel 1

Aufgabe 1:

Nach Gl. 1.20:

$$\beta = \frac{\lg U_1 - \lg U_2}{\lg I_1 - \lg I_2} = \frac{2,675 - 2,301}{-1 + 2,8697}$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{\beta = 0,2}}$$

$$\lg C = \lg U - \beta \lg I \Rightarrow \underline{\underline{C = 750 \Omega}}$$

Aufgabe 2:

- a.) Spannung falle nur an R_v ab d. h. $I = U/R_v = 20 \text{ V}/40 \Omega = 0,5 \text{ A}$
 \Rightarrow Arbeitsgerade schneidet: $U = 20 \text{ V}$ bei $I = 0 \text{ A}$
 $I = 500 \text{ mA}$ bei $U = 0 \text{ V}$
- b.) I steigt mit U minimal an, da NTC sehr hochohmig ist; bei $U \approx 32 \text{ V}$ ist Arbeitspunkt A erreicht, ohne weitere Steigerung von U steigt I rasch an auf ca. 320 mA ;
 sprunghafter Übergang von Arbeitspunkt A \rightarrow B, weitere Erhöhung von U ; I steigt, Arbeitspunkt B \rightarrow C.
- c.) Abnahme von U ; I sinkt bis Arbeitspunkt D erreicht ist, sprunghafte Abnahme von I , Arbeitspunkt D \rightarrow E, danach wieder stetige I -Abnahme.
- d.)

$$R_{MIN} = \frac{U}{I} = \frac{35 \text{ V}}{150 \text{ mA}} \Rightarrow \underline{\underline{R_{MIN} > \sim 250 \Omega}}$$

Aufgabe 3:

$$P_{NTC} = C \cdot (T - T_U) = U^2/R_T; R_T = A \cdot \exp\{B/T\}$$

Geg. $B = 6000 \text{ K}$; $T_U = 298 \text{ K}$

$$U^2/R_T = C \cdot (T - T_U) \Leftrightarrow U^2 = R_T \cdot C \cdot (T - T_U) \Leftrightarrow U^2 = A \cdot C \cdot \exp\{B/T\} \cdot (T - T_U)$$

Extremwert: $dU/dT = 0 \Leftrightarrow dU^2/dT = 0$

$$\Rightarrow 0 = A \cdot C \cdot [\exp\{B/T\} \cdot (T - T_U)]' \Leftrightarrow 0 = [\exp\{B/T\} \cdot (T - T_U)]'$$

$$\Leftrightarrow 0 = [\exp\{B/T\} \cdot T - \exp\{B/T\} \cdot T_U]'$$

$$\Leftrightarrow 0 = \exp\{B/T\} - B/T \cdot \exp\{B/T\} + B/T^2 \cdot T_U \cdot \exp\{B/T\} \Leftrightarrow 0 = 1 - B/T + T_U \cdot B/T^2$$

$$\Leftrightarrow 0 = T^2 - B \cdot T - T_U \cdot B \Rightarrow T_{1/2} = \frac{1}{2} \cdot (B \pm \sqrt{B^2 - 4 \cdot B \cdot T_U})$$

$$\Rightarrow T_1 = 5685,52 \text{ K} \Rightarrow \text{nicht relevante Lösung da } T \text{ zu groß ist.}$$

$$\underline{\underline{T_2 = 314 \text{ K}}}$$

Ab welchen B - Werten wird kein Spannungsmaximum mehr erreicht?

$$B^2 - 4 \cdot B \cdot T_U < 0$$

$$\Rightarrow B < 4 \cdot T_U \Rightarrow \underline{\underline{B < 1192 \text{ K}}}$$

Aufgabe 4:

$$\begin{aligned} \text{a.) } C_p \cdot n^\beta &= C && \text{mit } C = \frac{1}{2} C \\ n^\beta &= 2; \\ \beta = 0,4: n &= \sqrt[\beta]{2} = 5,66 \Rightarrow \underline{n = 6} \\ \beta = 0,2: n &= \sqrt[\beta]{2} = \underline{32} \end{aligned}$$

Ergebnis: bei kleineren β -Faktoren benötigt man eine unwirtschaftlich hohe Zahl von VDR, daher hat die Parallelschaltung keine große Bedeutung.

$$\text{b.) Geg.: } C = 500 \, \Omega; \beta = 0,4; I = 500 \, \text{mA}$$

Ges. R, r_d, P

$$R = C \cdot I^{(\beta-1)}; \quad r_d = \beta \cdot R; \quad P = C \cdot I^{(\beta+1)}$$

$$R = (500 \, \Omega \cdot 0,5^{0,4} \, \text{mA}) / (0,5 \, \text{mA}) = 500 \, \Omega \cdot 0,5^{-0,6} = 757,86 \, \Omega \Rightarrow \underline{R \approx 758 \, \Omega}$$

$$r_d = 0,4 \cdot 758 \, \Omega \Rightarrow \underline{r_d \approx 303 \, \Omega}$$

$$P = 500 \, \Omega \cdot 0,5^{0,4} \, \text{mA} \cdot 0,5 \, \text{mA} = 378,93 \, \text{V} \cdot 0,5 \, \text{mA}$$

$$\underline{P = 189,5 \, \text{W}}$$

Aufgabe 5:

$$TK = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta \vartheta} = \frac{1}{10^7 \, \Omega} \cdot \frac{2 \cdot 10^3 \, \Omega}{2 \, ^\circ\text{C}}$$

$$\underline{TK = 100 \, \text{ppm}/^\circ\text{C}}$$

Aufgabe 6:

$$R = R_0 + R_0 TK$$

$$(R_{CU} + R_{Konst}) + (R_{CU} + R_{Konst}) TK_{ges} \Delta \vartheta = R_{CU} + R_{CU} TK_{Cu} \Delta \vartheta + R_{Konst} + R_{Konst} TK_{Konst} \Delta \vartheta$$

$$TK_{ges} = \frac{1}{R_{CU} + R_{Konst}} \cdot \frac{R_{CU} TK_{Cu} \Delta \vartheta + R_{Konst} TK_{Konst} \Delta \vartheta}{\Delta \vartheta}$$

$$\underline{TK_{ges} = -8,35 \, \text{ppm/K}}$$

Aufgabe 7:

$$\text{a.) } R = R_0 \cdot (1 + TK \Delta \vartheta) \Rightarrow R/R_0 = 1 + TK \Delta \vartheta$$

$$\Delta R/R_0 = -0,04 \text{ bei } \Delta \vartheta = 80 \, ^\circ\text{C}$$

$$(R - R_0)/R_0 = (R/R_0) - 1 = -0,04 \Rightarrow TK \Delta \vartheta = -0,04 \Leftrightarrow TK = -0,04/80 = -5 \cdot 10^{-4} \, 1/\text{K}$$

$$\Rightarrow \underline{TK = -500 \, \text{ppm/K}}$$

b.) $P = U^2/R$

$$\frac{\Delta P}{P_0} = \frac{P - P_0}{P_0} = \frac{\frac{U^2}{R} - \frac{U^2}{R_0}}{\frac{U^2}{R_0}} = \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right) \cdot R_0 = \frac{R_0}{R} - 1$$

mit $R_0 = 10 \text{ k}\Omega$ und $R(\vartheta = 100 \text{ }^\circ\text{C}) = 9,6 \text{ k}\Omega$

$\Rightarrow \Delta P/P_0 = 0,041666.. \approx 4,2 \%$

Leistung erhöht sich um 4,2 %

c.) P_Z ist auf die Hälfte der Nennleistung P_N zu reduzieren.

d.) $R = R_0 + R_0 \cdot TK \Delta\vartheta$

$$[R_0(M) + R_0(Cu)] + [R_0(M) + R_0(Cu)] TK_{ges} \Delta\vartheta =$$

$$= R_0(M) + R_0(M) TK(M) \Delta\vartheta + R_0(Cu) + R_0(Cu) TK(Cu) \Delta\vartheta$$

$$0 = R_0(M) TK(M) \Delta\vartheta + R_0(Cu) TK(Cu) \Delta\vartheta$$

$$\underline{R_0(Cu) = 1,163 \text{ k}\Omega}$$

Aufgabe 8:

a.) $U_{PTC} = 10 \text{ V}; U_{RV} = 90 \text{ V}; I = 90 \text{ mA}$

$$P_V = U \cdot I$$

$$P_V = 90 \text{ V} \cdot 90 \text{ mA}$$

$$\underline{P_V = 8,1 \text{ W}}$$

b.) $P_{V \max} = 130 \text{ mA} \cdot 83 \text{ V}$

$$\underline{P_{V \max} = 10,8 \text{ W}}$$

c.) AP1 \rightarrow AP2 \approx Maximum der PTC-Kennlinie

$\Rightarrow U_{PTC}$ steigt geringfügig (U_{RV} sinkt); I steigt stark an

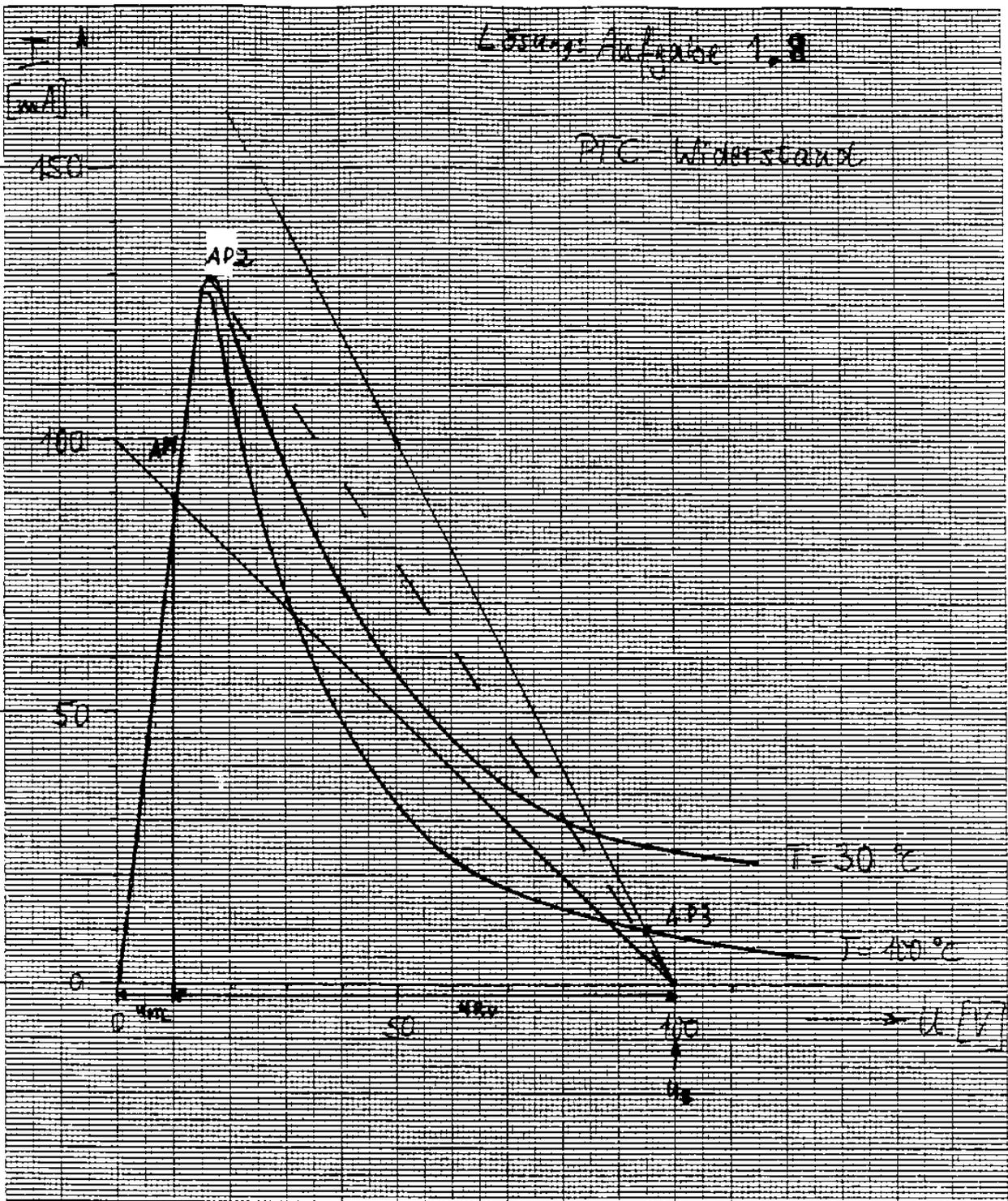
AP2 \rightarrow AP3 rapides, sprunghaftes Absinken von I und U_{RV} ; Anstieg von U_{PTC}

$$P_V = 10 \text{ mA} \cdot 5 \text{ V}$$

$$\underline{P_V = 50 \text{ mW}}$$

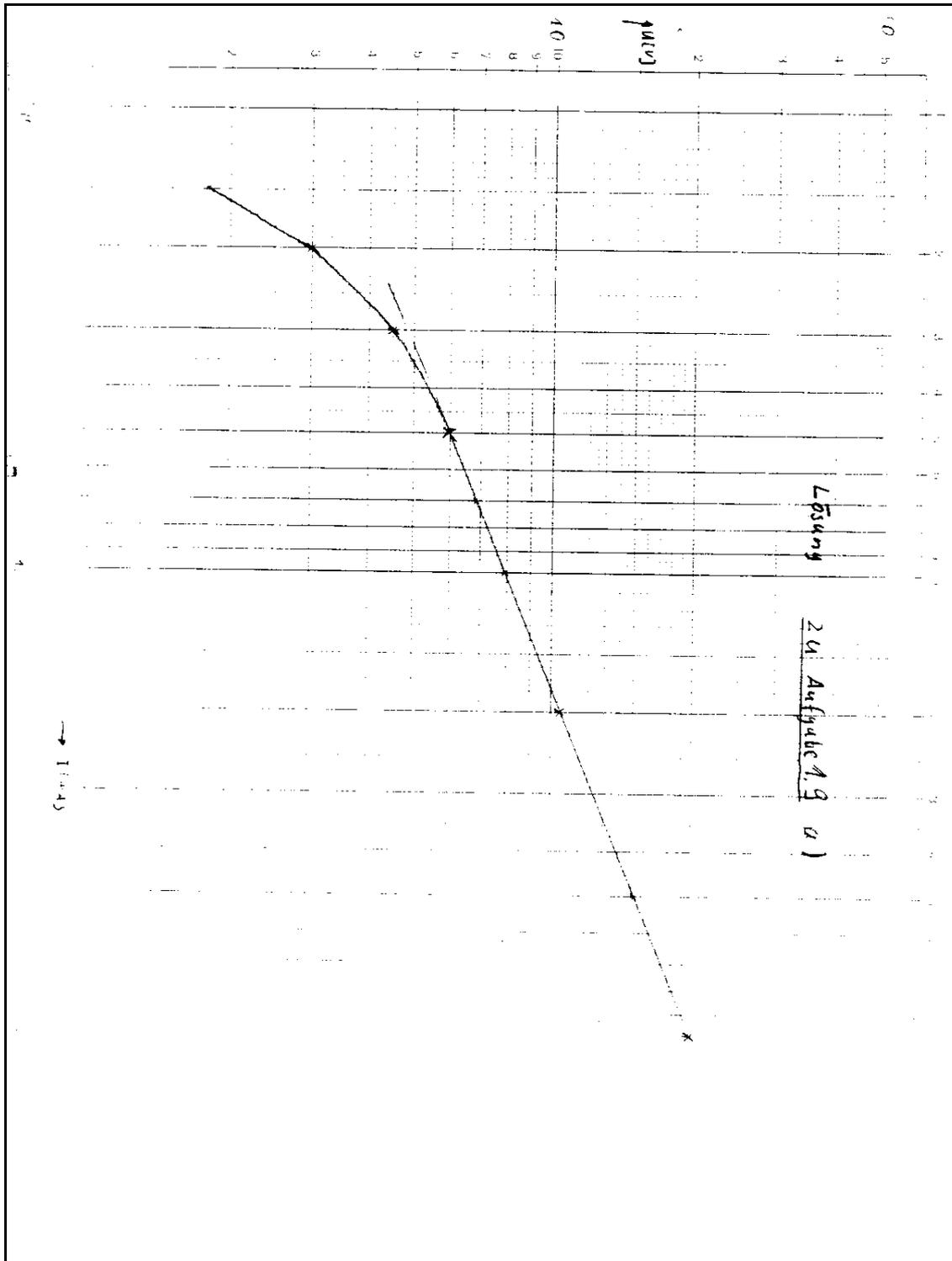
$$R_{PTC} = 95 \text{ V} / 10 \text{ mA}$$

$$\underline{R_{PTC} = 9,5 \text{ k}\Omega}$$



Aufgabe 9:

a)



$$b.) U = C \cdot I^\beta \Leftrightarrow \lg U = \lg C + \beta \cdot \lg I$$

$$\Rightarrow \beta = \frac{\lg U_1 - \lg U_2}{\lg I_1 - \lg I_2}$$

$$\underline{\underline{\beta = 0,4}}$$

$$\underline{\underline{C = 20\Omega}} \quad (\text{bei } I = 1 \text{ A ablesbar}); \quad \underline{\underline{C \neq \text{konstant bei } I < 50 \text{ mA}}}$$

$$c.) R = U / I$$

$$R = 7,96 \text{ V} / 0,1 \text{ A} \quad \Rightarrow \quad \underline{\underline{R \approx 80 \Omega}}$$

$$r_d = dU / dI = \beta \cdot C \cdot I^{\beta-1} = \beta \cdot R$$

$$r_d = 0,4 \cdot 80 \Omega$$

$$\underline{\underline{r_d = 32 \Omega}}$$

R = Sekante an die U(I) - Kennlinie

r_d = Tangente an die U(I) - Kennlinie

Aufgabe 10:

zu a)

$$I_{\text{NTC}} = 20 \text{ mA}$$

$$U_{\text{NTC}} = 19 \text{ V}$$

zu b)

$$\text{AP 2 : } U_{\text{NTC,max}} = 32 \text{ V}$$

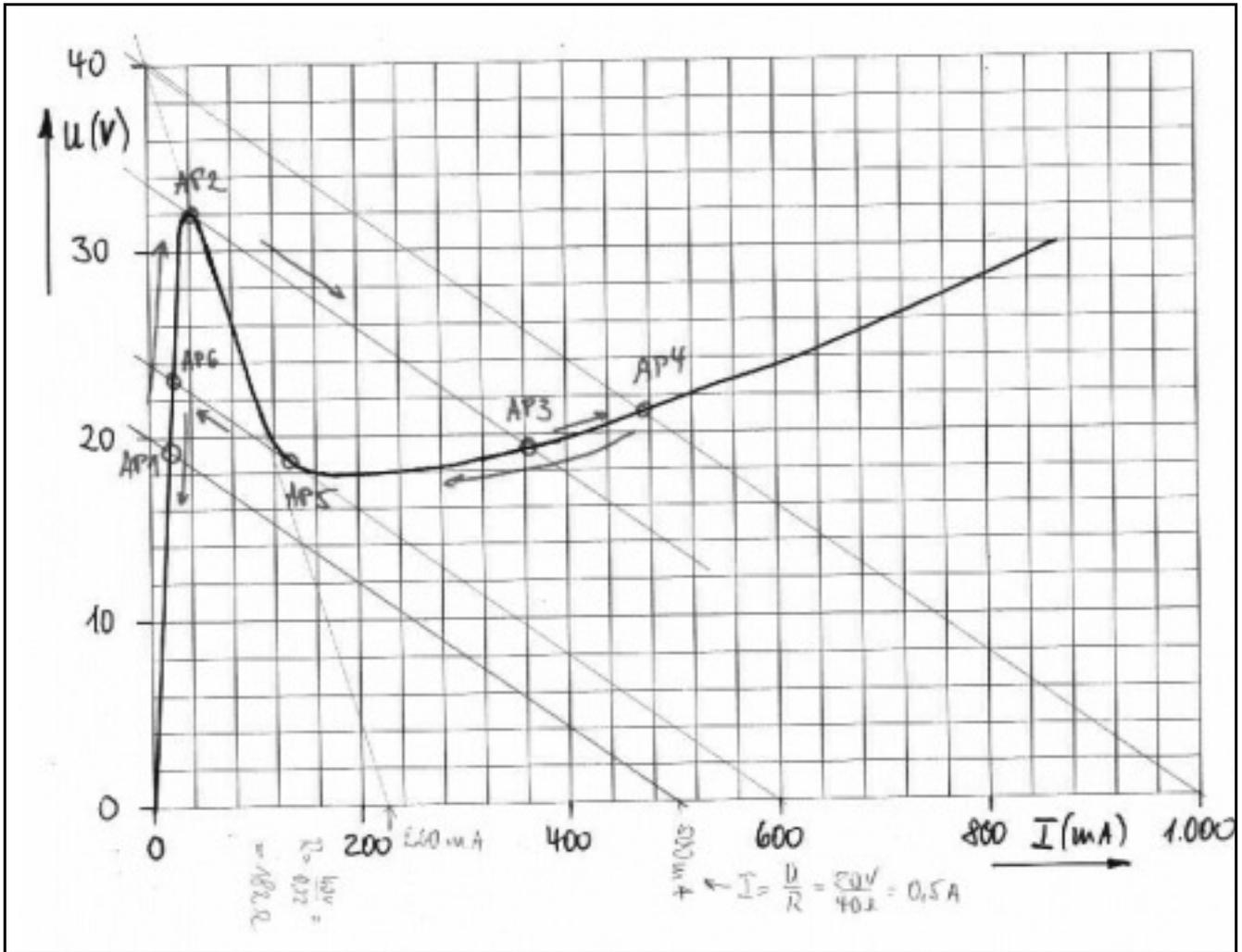
$$\text{AP 4 : } I_{\text{NTC,max}} = 480 \text{ mA}$$

zu c) aus Diagramm:

$$R_{\text{ges}} = \frac{40 \text{ V}}{0,22 \text{ A}} = 182 \Omega$$

$$R_{\text{ges}} = R_i + R$$

$$R = 182 \Omega - 40 \Omega = 142 \Omega$$



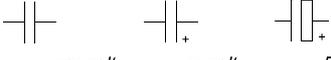
1.6 Quellenverzeichnis:

- /1/ Hans R. Lacour
Elektronische Bauelemente Bd.1, Verlag Berliner Union, Stuttgart 6, 14, 15, 17, 20, 26,
40, 44
- /2/ Ekbert Hering, Klaus Bressler, Jürgen Gutekunst
Elektronik für Ingenieure, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1992 6, 15, 27, 33-35, 38, 42
- /3/ Rutronik Elektronische Bauelemente GmbH
Katalog Elektronische Bauelemente, RSC Halbleiter 9, 15, 19, 20, 22, 23, 25, 26, 32, 38
- /4/ Schuricht
Elektronische Bauteile, erscheint jährlich 15
- /5/ Farnell Electronic Components GmbH
Der Elektronik Katalog, erscheint ½-jährlich 15, 23
- /6/ Böge Alfred
Arbeitshilfen und Formeln für das technische Studium, Bd. 4 Elektrotechnik/Elektronik
Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 1992 26
- /7/ Wolfgang Bauer, Hans Herbert Wegener
Bauelemente und Grundsaltungen der Elektrotechnik
Grundlagen und Anwendungen Bd. 1
Carl Hanser Verlag München-Wien 37, 41, 43-45, 47
- /8/ Herbert Tholl
Bauelemente der Halbleiterelektronik, Bd.2
B. G. Teubner Stuttgart, 1978 43, 47

2. Kondensatoren

2.1 Allgemeine Eigenschaften

Ein Kondensator kann als Ladungsspeicher aufgefasst werden. Er besitzt eine Kapazität C , die ein Maß für das Speichervermögen ist.

Symbol: 
unpolp *gepolt* *Elko gepolt*

Einheit: Farad ($F = C/V = As/V$)

Definition nach DIN 1301: Ein Kondensator besitzt die Kapazität von 1 F, wenn bei einem Strom von 1 A innerhalb einer Sekunde die Spannung auf 1 V ansteigt.

Ein Kondensator verhält sich unterschiedlich, wenn er im Gleichstromkreis oder im Wechselstromkreis eingesetzt wird.

a) Kondensator im Gleichstromkreis

Seine Kapazität läßt sich durch die Gleichung (2.1) ausdrücken:

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad (2.1)$$

mit: A = Plattenfläche des Kondensators
 d = Abstand der Elektroden
 ϵ_0 = elektrische Feldkonstante
 ϵ_r = Permittivitätszahl (relative Dielektrizitätskonstante)

Die im Kondensator gespeicherte Ladung beträgt:

$$Q = C \cdot U \quad (2.2)$$

Die Kapazität C wird auch als Gleichstromkapazität $C_{\text{=}}$ bezeichnet und ist Ausdruck für das Speichervermögen des Kondensators.

Der im Kondensator gespeicherte Energieinhalt W ist gegeben durch Ausdruck (2.3):

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (2.3)$$

Wird ein Kondensator über eine Stromquelle bei konstanter Spannung U aufgeladen, so muß diese eine Arbeit W aufbringen, die durch folgenden Ausdruck gegeben ist:

$$W = C \cdot U^2 \quad (2.4)$$

Es zeigt sich, daß lediglich die Hälfte der durch die Stromquelle aufgebrauchten Arbeit als gespeicherte Energie im Kondensator wiederzufinden ist. Die andere Hälfte geht durch Verlustwärme im Stromkreis verloren.

Die ungleichnamigen Ladungen auf den Kondensatorplatten bewirken eine anziehende Kraft F , die auf das zwischen den Platten befindliche Dielektrikum einen Druck ausübt:

$$\begin{aligned} F &= \frac{W}{d} = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot A \cdot E \\ \frac{F}{A} &= \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot E^2 \end{aligned} \quad (2.5)$$

mit: E = elektrische Feldstärke

Wird der aufgeladene Kondensator über einen Widerstand R kurzgeschlossen, so fließt ein Strom, der exponentiell mit der Zeit t abnimmt. Es gilt folgende bekannte Gesetzmäßigkeit :

$$I = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{R \cdot C}\right) \quad (2.6)$$

b) Kondensator im Wechselstromkreis

Der Kondensator verhält sich wie ein frequenzabhängiger Widerstand mit dem Blindwiderstand X_C :

$$\begin{aligned} X_C &= \frac{1}{j \omega C} \\ i_C &= u_C \cdot j \omega C \end{aligned} \quad (2.7)$$

mit: Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$

Die Kapazität C wird auch als Wechselstromkapazität C_{ω} bezeichnet. Im idealen Kondensator sind C_{ω} und C gleich groß. Diese Betrachtung gilt jedoch nicht für den realen Kondensator, da dieser Induktivitäten und Zuleitungswiderstände aufweist. Mit steigender Frequenz werden immer größere Bereiche der vorhandenen Kapazität nicht mehr erfaßt, weshalb die Kapazität C_{ω} abnimmt.

Bei einem verlustfreien Kondensator tritt zudem zwischen Strom und Spannung eine Phasenverschiebung von 90° auf.

Die Kapazität eines Kondensators ist i.A. sehr klein und bemisst sich in mF, μ F, nF, pF oder gar fF. Eine Vergrößerung der Kapazität C lässt sich gemäß Ausdruck (2.1) prinzipiell durch eine Vergrößerung der Permittivität ϵ , eine Vergrößerung der Elektrodenfläche und eine Verringerung des Elektrodenabstandes realisieren.

Während die Größen "Fläche" und "Abstand" der Elektroden eine Frage der Technologie und des Herstellungsverfahrens sind, konzentriert sich die Betrachtung der Permittivität auf das Dielektrikum. Hier sind einige physikalische Fragen und Probleme zu behandeln.

2.2 Dielektrikum /1/

2.2.1 Dielektrische Stoffe

Man unterscheidet bei Kunststoffen und anderen molekularen Stoffen zwei große Stoffgruppen von Dielektrika:

- ! polare Stoffe
- ! unpolare Stoffe

Weitere für Kondensatoren geeignete Isolierstoffe sind:

- ! keramische Stoffe wie gewisse Ferroelektrika
- ! Metalloxide (z.B. Aluminiumoxid, Tantal-Pentoxid)

a) polare Stoffe

Polare Stoffe zeichnen sich dadurch aus, dass der Ladungsschwerpunkt der positiven Ladungen und jener der negativen Ladungen auch ohne äußeres elektrisches Feld nicht zusammenfällt. Moleküle polarer Stoffe weisen daher ein permanentes Dipolmoment auf. Ohne äußeres elektrisches Feld sind die Dipolmomente ungeordnet. Legt man ein elektrisches Feld an, ordnen sich die Dipole; man spricht von einer Orientierungspolarisation oder Dipolpolarisation. Die Polarisierung ist der elektrischen Feldstärke proportional. Es spielen bei diesem Vorgang Trägheit, Reibung und Temperatur eine bedeutende Rolle. Die Zeit, bis sich die Dipole in Feldrichtung ausgerichtet haben, heißt Relaxationszeit. Die Permittivität erreicht ihren Maximalwert.

Polare Dielektrika sind:

PVC, Papier, Polyester, Polycarbonat, Zellstoff, Bakelit, Wasser

Genannte Stoffe weisen bei Polarisierung eine hohe Permittivitätszahl auf; es können je nach Stoffgruppe Werte bis maximal 600 erreicht werden. Wasser beispielsweise hat ein ϵ_r von 81.

b) unpolare Stoffe

Stoffe dieser Gruppe haben kein permanentes Dipolmoment; durch Anlegen eines elektrischen Feldes wird eine gewisse Polarisierung erreicht; man spricht von einer Verschiebungs- oder Deformationspolarisation. Auch hier ist die Polarisierung der elektrischen Feldstärke proportional. Diese Vorgänge

folgen bis in den hohen GHz- Bereich praktisch trägheitslos.

Die Permittivitätszahl ist deutlich kleiner als bei polaren Stoffen - sie liegt bei Verschiebung zwischen 2 und 3,5 , ohne Verschiebung nahe 1.

Unpolare Dielektrika sind:

Polyäthylen, Styroflex, Teflon

Aus polaren und unpolaren Kunststoffen bestehende Dielektrika unterliegen Alterungsvorgängen, die durch molekulare Umlagerungen und mechanische Spannungen verursacht werden. Auch die Schutzschicht unterwandernde Feuchtigkeit verändert die Permittivitätszahl.

Genannte Dielektrika zeigen eine Temperaturabhängigkeit, die ähnlich wie bei Widerständen durch einen Temperaturkoeffizienten beschrieben wird:

$$TK_c = \frac{1}{C_0} \cdot \frac{dC}{d\vartheta} \quad (2.8)$$

c) Ferroelektrika

Diese Stoffe enthalten kein Eisen, wie der Name vermuten läßt, sondern sie verhalten sich ähnlich wie Ferromagnetika. Die Permittivität ist ähnlich der Permeabilität nicht konstant, sondern hängt von der elektrischen Feldstärke ab. Sie erreicht Werte von >200. Man spricht deshalb auch von nichtlinearen Dielektrika.

Ferroelektrika sind polare Substanzen, die eine starke Kopplung zwischen elementaren Dipolen haben. Durch Parallelausrichtung bilden sich Domänen (in Analogie zu den Weiss' schen Bezirken) mit spontaner Polarisierung. Oberhalb einer gewissen Temperatur, der sog. Curie-Temperatur, endet diese Ordnung und die Polarisierung bricht zusammen. Die Permittivitätszahl springt dann auf sehr hohe Werte bis zu 10.000 und sinkt wieder mit weiter steigender Temperatur. Man nennt diese Stoffe auch HDK-Massen (für hohe Dielektrizitätskonstante). Eine ausführliche Behandlung der physikalischen Eigenschaften von Ferroelektrika ist in Kapitel 1 zu finden.

Eine vielfach verwendete ferroelektrische Substanz ist Barium-Titanat ($Ba Ti O_3$).

2.2.2 Eigenschaften dielektrischer Stoffe

a) Dielektrische Nachladung

Das Dielektrikum kann, wenn an dem Kondensator eine Gleichspannung anliegt, über längere Zeiten Ladungen aufnehmen. Damit erhöht sich allmählich die Kapazität des Kondensators. Man nennt diesen Vorgang dielektrische Nachladung. Diese Nachladung verfälscht bei Messungen nicht nur den Isolationswiderstand, sondern auch die Kapazität des Kondensators. Da der Vorgang sehr langsam vonstatten geht, spielt er bereits bei der Netzfrequenz keine Rolle mehr.

Ursachen für die dielektrische Nachladung sind:

- ! im Imprägnierungsmittel vorhandenen Ionen
- ! lange Polarisationszeiten von großen Molekülgruppen
- ! Inhomogenitäten des Dielektrikums
- ! Oberflächenladungen bei geschichteten Dielektrika

Die Kapazität, die diese Ladungsaufnahme vernachlässigt heißt geometrische Kapazität.

b) Wiederkehrende Spannung

Entlädt man einen Kondensator und läßt anschließend die Klemmen offen, kann man unter Umständen nach längeren Zeiträumen erhebliche Spannungen an den Klemmen feststellen. Die zugehörige Ladung stammt aus einem Ladungsrückstand des Dielektrikums. Die in a) aufgeführten Ladungen des Dielektrikums bilden nach der Entladung ein inneres elektrisches Feld, das sich wegen der Hochohmigkeit nur langsam abbaut. Die langsam abfließenden Ladungen sammeln sich auf den Kondensatorelektroden solange bis sich eine Gegenfeld aufgebaut hat, welches das innere elektrische Feld in Gleichgewicht hält.

Die wiederkehrende Spannung (auch Rückspannung genannt) stellt vor allem im Umgang mit großen Leistungskondensatoren eine große Gefahr dar.

c) Einschlüsse bei gewickelten Dielektrika

Bei Einschlüssen, z.B. von Luft oder Gasen erhöht sich die elektrische Feldstärke um die Permittivitätszahl des eingeschlossenen Mediums. Dadurch steigt die Gefahr der Glimmentladung.

d) Glimmentladung

Glimmentladungen treten vor allem im Wechselstrombetrieb auf. Sie beginnt bei einer bestimmten Einsatzspannung, die von dU/dt abhängig ist und erhöht die Temperatur des Kondensators. Es besteht die Gefahr, daß durch die lokale Wärmebelastung Gase freigesetzt werden. Die Gasentwicklung kann im Extremfall den Kondensator zerstören. Eine Glimmentladung endet, wenn die Spannung zurückgenommen wird.

Hat bereits eine Glimmentladung stattgefunden, beobachtet man über einen längeren Zeitraum eine verringerte Glimm-Einsatzspannung. Dielektrika und Imprägnierungsmittel benötigen eine gewisse Zeit, um durch Glimmentladung entstandenen Gase zu resorbieren.

Bei Gleichspannungen ereignet sich meistens vor der Glimmentladung ein elektrischer Durchschlag.

e) Feuchtebeiwert

Das Dielektrikum kann aus der Umgebungsfeuchtigkeit Wasser aufnehmen. Wegen der hohen Permittivitätszahl von Wasser erhöht sich dadurch die Kapazität des Kondensators.

Der Feuchtebeiwert Δ_C eines Kondensators ist definiert wie folgt /1/:

Der Feuchtebeiwert der Kapazität Δ_C ist die durchschnittliche Änderung der Kapazität bei Änderung der relativen Feuchte um 1% bei konstanter Temperatur und Meßfrequenz des im jeweiligen Gleichgewicht mit dem Umgebungsklima befindlichen Kondensators innerhalb des Bereichs der relativen Feuchte F_2 und F_1 .

Der Feuchtebeiwert ist durch die Gleichung (2.9) gegeben:

$$\Delta_c = 2 \cdot \frac{(C_2 - C_1)}{(C_2 + C_1) \cdot (F_2 - F_1)} \quad (2.9)$$

Häufig wird der Feuchtebeiwert verschlüsselt auf dem Gehäuse vermerkt. Gemäß DIN40 040 findet man 3 Kennbuchstaben, von denen der erste Buchstabe die niedrigste Temperatur ϑ_{\min} angibt, welche die kälteste Stelle des Kondensator bei Inbetriebnahme haben darf. Der zweite Buchstabe steht für die höchste Temperatur ϑ_{\max} , die im ungünstigsten Fall an der wärmsten Stelle im Kondensator auftreten kann. Der dritte Buchstabe kennzeichnet die maximal zulässige relative Feuchte. Die folgende Tabelle gibt die Verschlüsselung dieser Angaben wieder /2/:

1. Buchstabe	E	F	G	H	J
ϑ_{\min} in °C	-65	-55	-40	-25	-10

2. Buchstabe	E	H	K	M	P	S	U	V	Y
ϑ_{\max} in °C	200	155	125	100	85	70	60	55	40

3. Buchstabe	C	F
max. rel. Feuchte	100% (Mittel > 80%)	95% (Mittel \geq 75%)

2.2.3 Lernfragen

- Nennen Sie drei Gruppen von dielektrischen Stoffen, die in Kondensatoren eingesetzt werden und nennen Sie je einen Vertreter dieser Stoffgruppe.
- Wo liegt bei den drei für Kondensatoren verwendete dielektrische Stoffen größenordnungsmäßig die Dielektrizitätskonstante?
- Was versteht man unter „dielektrischer Nachladung“. Wie macht sich dieses Phänomen bei der technischen Nutzung von Kondensatoren bemerkbar?
- Worin liegen die Ursachen für die dielektrische Nachladung in Kondensatoren?
- Was gibt der Feuchtebeiwert an?

2.3 Allgemeine Eigenschaften des technischen Kondensators

Nur ein idealer Kondensator kann als reiner Blindwiderstand betrachtet werden. Reale, technische Kondensatoren weisen induktive und ohmsche Verluste auf, die von den jeweiligen Bauformen und Betriebsbedingungen abhängig sind. Allgemein werden die Verluste durch den sog. Verlustfaktor $\tan \delta$ beschrieben. Der Verlustfaktor ist der Tangens des Verlustwinkels δ oder der Quotient aus Wirkleistung P_W zu Blindleistung P_B .

$$\tan \delta = \frac{P_W}{P_B} \quad (2.10)$$

Im idealen Kondensator gilt $P_W = 0$ und damit ist $\tan \delta = 0$.

Die Güte Q ist als der Kehrwert des Verlustfaktors definiert.

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} \quad (2.11)$$

2.3.1 Kondensatorverluste

Die Verluste setzen sich aus mehreren Anteilen zusammen.

a) Endliche Leitfähigkeit des Dielektrikums und Zuleitungswiderstände

Eine Dielektrikum besitzt einen endlichen Isolationswiderstand R_{isol} . Dieser ist bedingt durch Ionenwanderungen und Umpolarisation im Dielektrikum. Er macht sich bei Gleichspannung durch einen Leckstrom bemerkbar. R_{isol} wird im Kondensator-Ersatzschaltbild durch einen Parallelwiderstand R_p oder Leitwert G dargestellt.

Die Widerstände der Zuleitungen und Kontaktierungen werden im Ersatzschaltbild durch einen Serienwiderstand symbolisiert. Je nach betrachtetem Frequenzbereich überwiegt der Parallelwiderstand R_p oder der Serienwiderstand R_s .

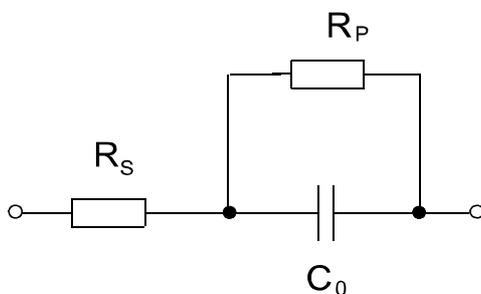


Abb. 1: Ersatzschaltbild eines Kondensators mit Zuleitungswiderstand R_s , Widerstand des Dielektrikums R_p und verlustfreier Kapazität C_0

Betrachtet man zunächst nur das Parallelersatzschaltbild wie es in Abbildung 1 gezeigt ist. Aus dem Zeigerdiagramm wird der Verlustfaktor abgeleitet:

$$\tan \delta = \frac{I_W}{I_B}$$

mit $I_W = \frac{U}{R_p} = \underline{U} \cdot G$

und $I_B = \underline{U} \cdot \omega C_0$

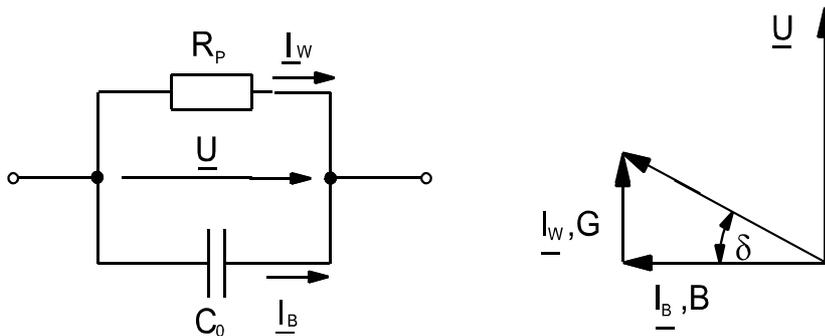


Abb. 2: Paralleles Ersatzschaltbild und zugehöriges Zeigerdiagramm

Der Verlustfaktor für das parallele Ersatzschaltbild ergibt sich damit zu:

$$\tan \delta_p = \frac{G_p}{\omega C_0} \quad (2.12)$$

Wird ein in Serie liegender Widerstand R_s betrachtet, ergibt sich aus dem Ersatzschaltbild und dem Zeigerdiagramm der Verlustfaktor $\tan \delta_s$.

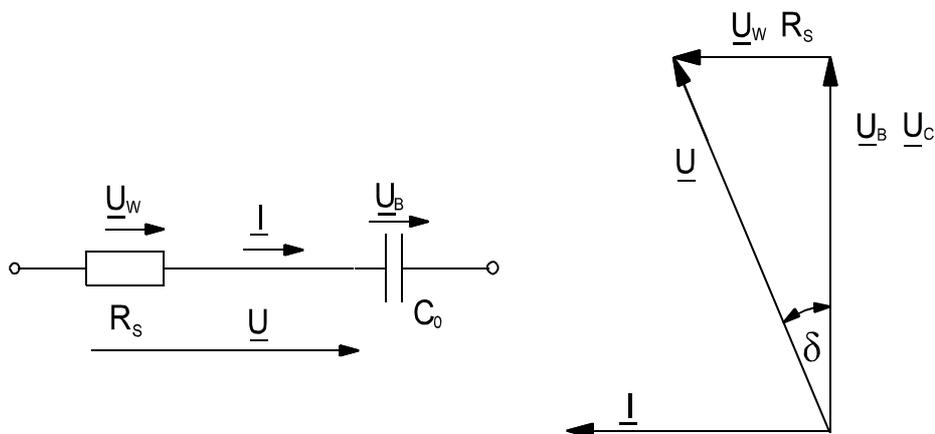


Abb. 3: Serielles Ersatzschaltbild eines Kondensators mit Zeigerdiagramm

$$\begin{aligned} \tan \delta_s &= \frac{U_W}{U_B} \\ \text{mit } U_W &= R_S \cdot I \\ \text{und } U_B &= \frac{I}{\omega \cdot C_0} \end{aligned}$$

Damit errechnet sich der Verlustfaktor zu:

$$\tan \delta_s = R_S \cdot \omega \cdot C_0 \quad (2.13)$$

Der Verlustfaktor $\tan \delta_p$ sinkt mit steigender Frequenz, während der Verlustfaktor $\tan \delta_s$ mit steigender Frequenz zunimmt.



Merke: Parallelwiderstände verschlechtern den Kondensator vor allem bei niedrigen Frequenzen, während serielle Widerstände bei hohen Frequenzen wirksam sind.

Der aus dem allgemeinen Ersatzschaltbild resultierende Verlustfaktor zeigt demnach einen ausgeprägten Gang mit der Frequenz und weist bei einem bestimmten Frequenzwert ein Minimum auf wie die folgende Abbildung zeigt.

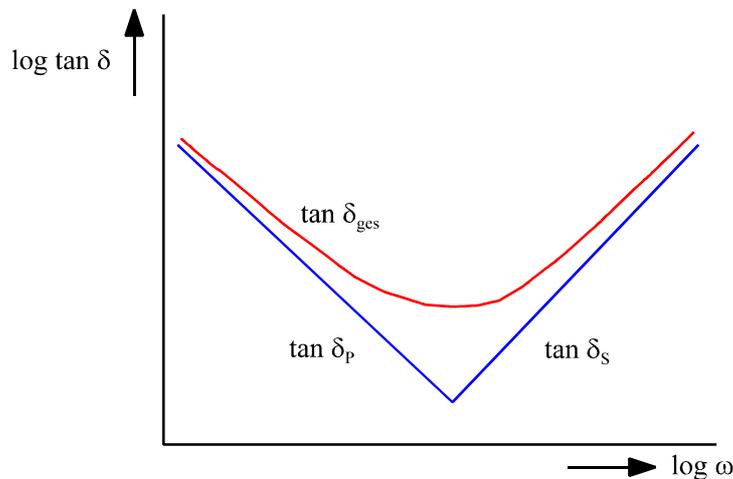


Abb. 4: Frequenzverlauf des Verlustfaktors für einen Kondensator

Aufgrund des endlichen Isolationswiderstandes entlädt sich ein aufgeladener Kondensator. Die Entladezeitkonstante τ ist gegeben durch:

$$\tau = R \cdot C$$

Sie wird oft in $M\Omega \cdot \mu F$ angegeben und besitzt die Dimension einer Zeit. Sie wird in den Datenbüchern auch als Isolationszeitkonstante oder Isolationsgüte bezeichnet.

b) Dielektrische Verluste

Sie entstehen durch dielektrische Absorption bei Wechselspannung. Manche Kunststoffe zeigen im Wechselfeld eine Dipoldrehung, die als Verlustanteil wirksam ist. Im Ersatzschaltbild werden die dielektrischen Verlust durch einen zusätzlichen, frequenzabhängigen Parallelwiderstand symbolisiert.

c) Induktive Verluste

Die Zuleitungsdrähte zeigen induktives Verhalten. Im Ersatzschaltbild ist deshalb noch eine Induktivität zu berücksichtigen. Sie führt im Kondensator zu unerwünschten Resonanzerscheinungen, die je nach Aufbau unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Oberhalb der Resonanzfrequenz wirkt der Kondensator wie eine Spule. Weist der Kondensator beispielsweise eine Kapazität von 100 nF auf und habe dieser Kondensator eine Induktivität von 10 nH, so beträgt die Resonanzfrequenz ca. 5 MHz.

d) Universelles Ersatzschaltbild

Das universelle Ersatzschaltbild gibt die wesentlichen Verlust des Kondensators wieder.

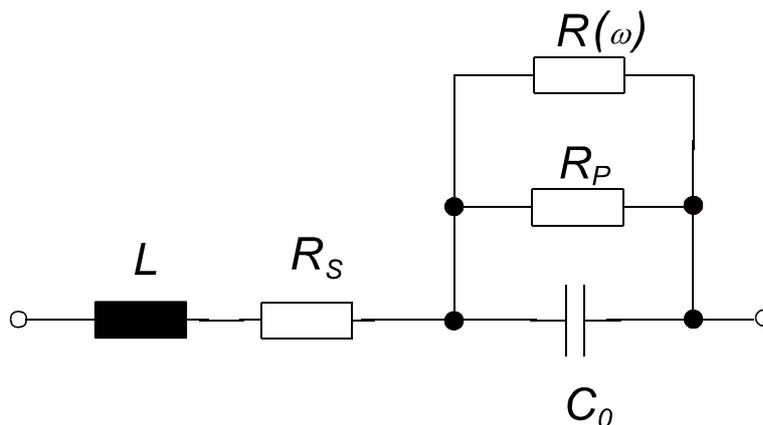


Abb. 5:Universelles Ersatzschaltbild für einen Kondensator

Die genannten Verluste verursachen eine Verlustleistung P_w , die sich aus der folgenden Formel (2.14) ergibt:

$$P_w = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \tan \delta \quad (2.14)$$

Die Verlustleistung wird in Wärme umgesetzt und führt zu einer thermischen Belastung des Kondensators. Bei einer zu hohen Wärmebelastung droht je nach Aufbau des Kondensators der sog. Wärmedurchschlag.

2.3.2 Technische Kennzeichnungen

- * Nennkapazität C (rated capacitance)
Nach der Nennkapazität ist der Kondensator benannt. Sie bezieht sich auf den Kapazitätswert bei einer Umgebungstemperatur von 20°C oder einer Oberflächentemperatur des Kondensators von 40°C. Sie wird häufig in μF oder pF angegeben. Die wirksame Kapazität hängt jedoch von der Art der Schaltung ab.
- * Nennspannung U_N (rated /operating voltage)
Nach der Nennspannung ist der Kondensator benannt. Sie bezieht sich auf die maximale Gleichspannung bei einer Oberflächentemperatur von 40°C, bei welcher der Kondensator im Dauerbetrieb ohne Schaden betrieben werden kann. Die technische Auslegung des Kondensators bestimmt die Nennspannung, d.h. die Isolation der Beläge gegeneinander. Bei Wechselspannungen darf der Effektivwert nicht höher als U_N sein. Nennwechselspannungen sind nicht generell genormt. Bei höheren Temperaturen ist die Nennspannung um einen gewissen Lastminderungsfaktor zu reduzieren.
- * Prüfspannung
Mit der Prüfspannung wird der Kondensator auf Spannungsfestigkeit geprüft. Sie darf nur vorübergehend und für Prüfzwecke angelegt werden. Je nach zu prüfendem Kondensatortyp beträgt die Prüfspannung das 1,4- bis 2,5-fache der Nennspannung.
- * Kapazitätstoleranz (capacitance tolerance)
Sie gibt das zulässige Verhältnis von tatsächlicher Kapazität zur Nennkapazität an. Die Angabe erfolgt in % und ist häufig auf den Gehäuse aufgedruckt. Die Angabe bezieht sich auf den Neuzustand des Kondensators. Die Toleranz kann durch Lagerung (z.B. in feuchter Umgebung) oder im Betrieb größer werden.
- * Temperaturkoeffizient (temperature coefficient of capacitance)
Der Temperaturkoeffizient α gibt die Änderung der Kapazität mit der Temperatur wieder relativ zur Nennkapazität bei der Bezugstemperatur von +20°C. Die Angabe erfolgt in der Regel in $\text{ppm}/^\circ\text{C}$. Die Kapazität berechnet sich nach folgender Formel:

$$C = C_{20^\circ\text{C}} \cdot [1 + \alpha \cdot (\vartheta - 20^\circ\text{C})] \quad (2.15)$$

- * Impulsbelastbarkeit (pulse stressing)
Eine plötzliche Spannungsänderung du in der Zeit dt verursacht einen Strom i im Kondensator nach folgender bekannter Formel:

$$i = C \cdot \left(\frac{du}{dt} \right)$$

Zu hohe Ströme schädigen die Kontaktierung zwischen den Elektroden und den Anschlußdrähten. In den Datenblättern findet man die zulässige Flankensteilheit $F_N = du/dt$ (pulse rise time) für einen Spannungshub auf die Nennspannung $U_{N \cdot \text{TF}}$ wird in V/μ angegeben. Für kleinere Betriebsspannungen als der Nennspannung sind höhere Impulsanstiegszeiten zulässig.

- * Isolationswiderstand und Zeitkonstante (Insulation resistance/time constant)

Der Isolationswiderstand ist das Verhältnis der angelegten Gleichspannung (oft 100V) zu dem nach einer festgelegten Zeit (oft 1 Minute) fließenden Strom. Die Angabe erfolgt in der Regel in Megaohm. Die Zeitkonstante der Selbstentladung gibt an, wie viele Sekunden nach Abtrennen von der Gleichspannungsquelle die Spannung zwischen den Anschlüssen eines geladenen Kondensators auf $1/e \approx 37\%$ abgesunken ist. Die Zeitkonstante liegt typischerweise zwischen 10.000s und 100.000s. Beide Größen sind ein Maß für die Güte des Isolators (Isolationsgüte) und damit des Kondensators.

* Verlustfaktor (dissipation factor)

Der Verlustfaktor wurde in Kap.2.3.1 ausführlich diskutiert.

* Scheinwiderstand (impedance)

Der Scheinwiderstand Z ist der Betrag der vektoriellen Summe von Ersatzserienwiderstand R_s und Serienkapazität C in der Ersatzschaltung unter Berücksichtigung einer Serieninduktivität L . Der Scheinwiderstand berechnet sich nach folgender Formel:

$$Z = \sqrt{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2 + R_s^2} \quad (2.16)$$

Der Scheinwiderstand ist frequenz- und temperaturabhängig. Bei der Resonanzfrequenz erreicht Z ein Minimum, bei höheren Frequenzen steigt Z wieder an. Das Minimum hängt von der Nennkapazität des Kondensators ab. Ein typischer Verlauf des Scheinwiderstandes zeigt die folgende Abbildung, die einem Datenblatt entnommen ist /3/ :

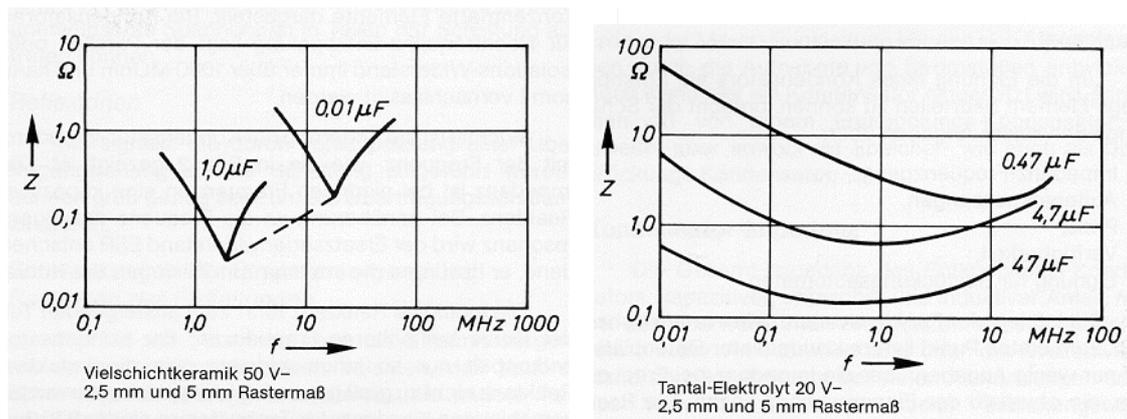


Abb. 6: Frequenzgang des Scheinwiderstandes für Vielschicht-Keramik-Kondensatoren und für Tantal-Elektrolyt-Kondensatoren unterschiedlicher Kapazität

* Normen, Qualitätsvorschriften, Klassifizierung

Es bestehen umfangreiche weltweite, europäische und nationale Normen und Qualitätsvorschriften.

Weltweite Normungsvorschrift:

IEC: International Electrotechnical Commission

Europäische Normungsvorschrift:

CENELEC: Comité Européen de Normalisation Electrotechnique

CECC: CENELEC Electronic Component Committee

Nationale Normen:

VDE und DIN

Die Klassifizierung von Kondensatoren erfolgt entweder wie bei Widerständen nach E-Reihen oder in Klartextbeschriftungen. Oft sind Erläuterungen der verwendeten Beschriftungen in den Datenblättern zu finden.

2.3.3 Lernfragen

- a) Welche Verluste treten in Kondensatoren auf und wodurch sind sie bedingt?
- b) Welches allgemeine Ersatzschaltbild liegt einem verlust-behafteten Kondensator zugrunde und welche Komponenten des Ersatzschaltbildes sind überwiegend bei hohen bzw. bei niedrigen Frequenzen zu berücksichtigen?
- c) Warum tritt in der Regel im Frequenzgang des Scheinwiderstandes eines technischen Kondensators ein Minimum auf?

2.4 Bauformen und Anwendungen

Technische Kondensatoren können in zwei große Klassen eingeteilt werden:

- * Kondensatoren mit einer festen Nennkapazität
- * Kondensatoren mit variabler, einstellbarer Kapazität

Wegen der großen technischen Bedeutung haben sich vor allem bei Kondensatoren mit fester Nennkapazität verschiedene Bauteilfamilien mit unterschiedlichen Aufbau herausgebildet. Der Stammbaum ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Ein Anwender wählt nach Kriterien wie Verlustfaktor, Isolationswiderstand, Kapazitätstoleranz, Temperaturkoeffizient, Frequenzabhängigkeit, Nennspannung, Gehäuseform usw. aus. Diese Größen hängen von der Bauart und dem verwendeten Dielektrikum ab.

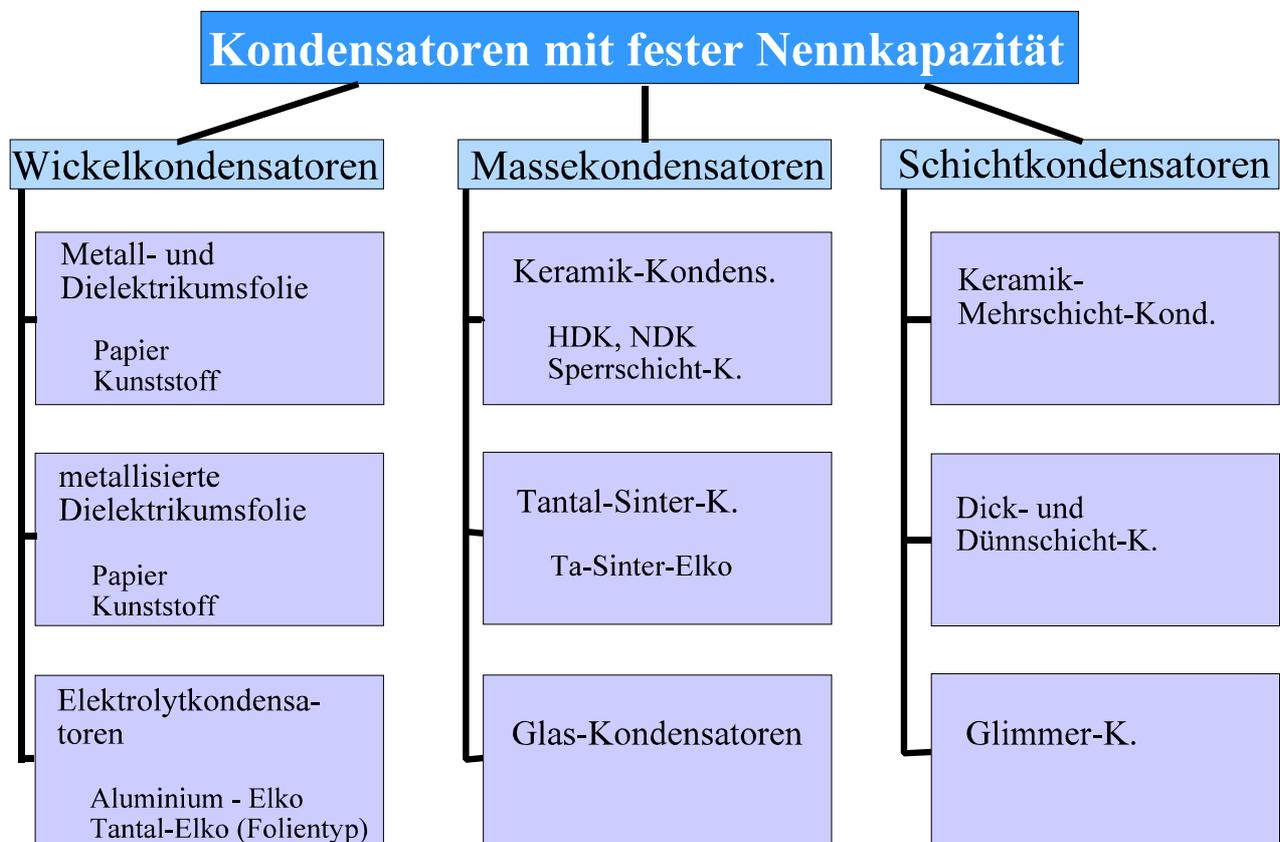


Abb. 7: Familienstammbaum von Festkondensatoren

2.4.1 Wickelkondensatoren

Man unterscheidet zwei grundsätzlich unterschiedliche Aufbauformen von Wickelkondensatoren:

- ! Metallfolie und dielektrische Folie abwechselnd gewickelt, sog. Metallfolienkondensator
- ! metallisierte Folie gewickelt

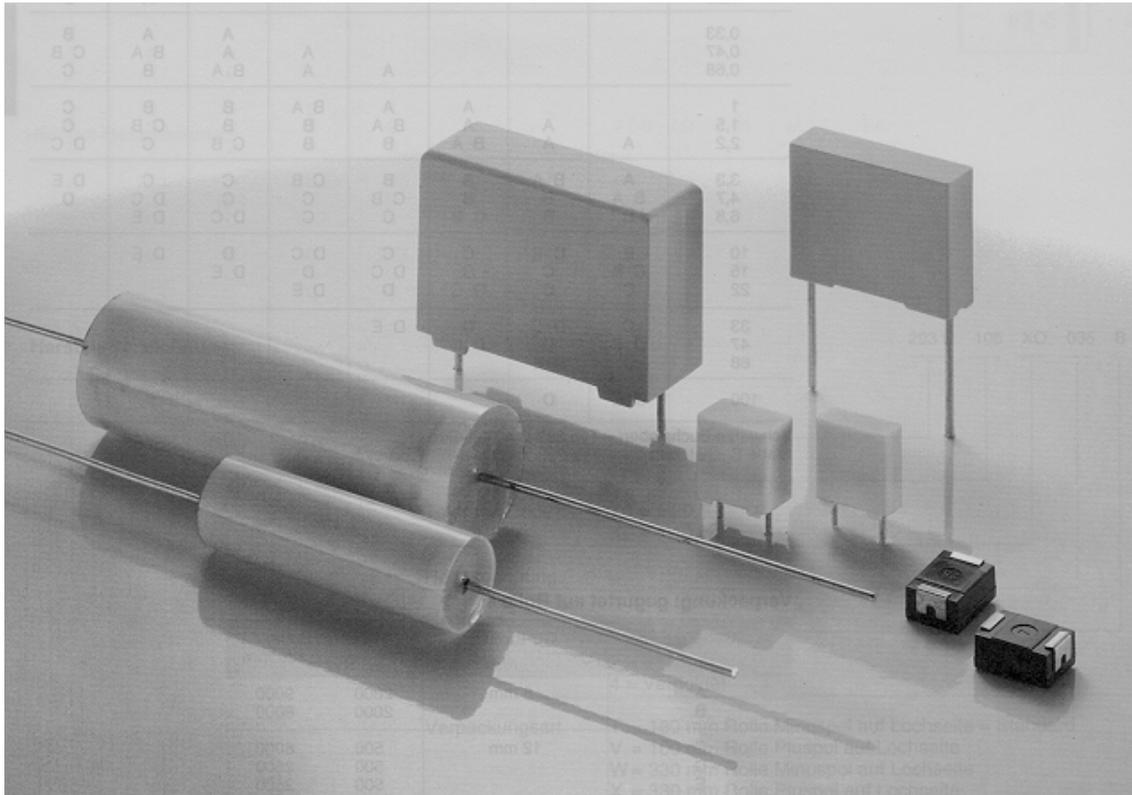


Abb. 8: Typische Bauformen von Wickelkondensatoren /4/

a) Aufbau eines Metallfolienkondensators

Wie in der folgenden Abbildung dargestellt ist, werden bei diesem Kondensatortyp abwechselnd bandförmige Metallfolien und bandförmige Papier- oder Kunststofffolien auf Automaten so aufgewickelt, daß die Beläge allseitig durch die Dielektrikumsbänder voneinander isoliert sind. Die Folien bestehen i.A. aus Aluminium und weisen aus Stabilitätsgründen eine Mindestdicke von $5\mu\text{m}$ auf. Bei manchen Typen werden beim Wickelvorgang einigen Metallstreifen eingewickelt, die später mit den Anschlußdrähten verbunden werden. Der Wickel wird abschließend stirnseitig durch Verlöten oder ein Spritzverfahren metallisiert.

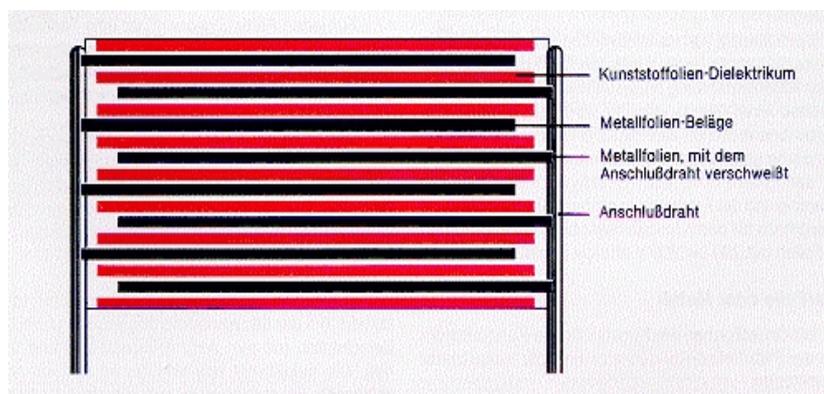


Abb. 9: Aufbau eines Kondensators mit abwechselnd gewickelter Metallfolie und dielektrischen Folie, sog. Metallfolien-Kondensators /5/

Als dielektrische Folien finden Papier und verschiedenen Kunststoffe Verwendung.

Bezeichnung von Metallfolien - Papier - Kondensatoren: P

Bezeichnung von Metallfolien - Kunststoff - Kondensatoren: K

b) Aufbau eines Folienkondensators mit metallisierter Folie

Dielektrische Folien werden mit einem dünnen Metallfilm bedampft und dann mit leichter Versetzung benachbarter Lagen eng gewickelt. Die überstehenden Enden werden anschließend durch Metallisierung kontaktiert. Das Metallisieren ist ein Spritzverfahren, das von Schoop entwickelt wurde. Man nennt den Vorgang daher "schoopisieren" oder "schoopieren".

Als dielektrische Folien finden ebenfalls Papier und verschiedenen Kunststoffe Verwendung.

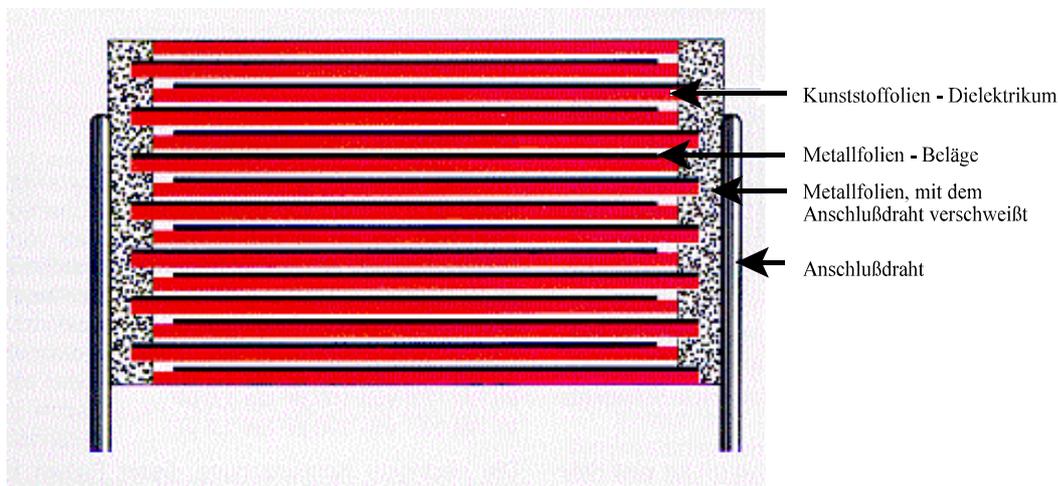


Abb. 10: Aufbau eines Kondensators aus gewickelter metallisierter dielektrischer Folie /5/

Bezeichnung von metallisierter Papierfolie: MP

Bezeichnung von metallisierter Kunststoffolie: MK

Mit verfeinerter Technik wurden die Folien in Laufe der Zeit immer dünner. Heute lassen sich Folienstärken von $1\mu\text{m}$ realisieren.

Als charakteristische Bauformen werden die zylindrische und die Blockform mit den gängigen Rastermaßen sowie SMD-Formen gefertigt.

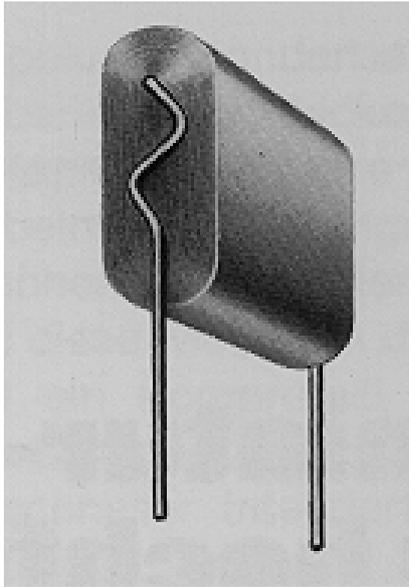


Abb. 11: stirnseitige Kontaktierung eines Wickelkondensators mit geringer Dämpfung /5/

Die Block- und SMD-Formen erhalten eine Stirnkontaktierung, d.h. die Belagkanten werden durch die Anschlußdrähte leitend verbunden, wodurch die Induktivität des Wickels kurzgeschlossen wird. Es entstehen dämpfungsarme Kondensatoren mit einem außerordentlich günstigen Eigenresonanzverhalten

c) Vergleich des Metallfolientyps mit metallisierten Folientyp

Der metallisierte Folientyp ist ausheilfähig.

Dünne Folien sind bekanntlich nicht frei von Löchern und Fehlstellen (pinholes, bubbles, weakspots). Papierfolien weisen im Vergleich zu Kunststofffolien die höchste Fehlstellendichte auf. Trotz mehrlagiger Wicklungen kommt es nach dem Wickeln der bedampften Folien zu Kurzschlüssen. Durch Anlegen einer geeigneten Spannung brennen die leitenden Verbindungen weg; der Vorgang wird

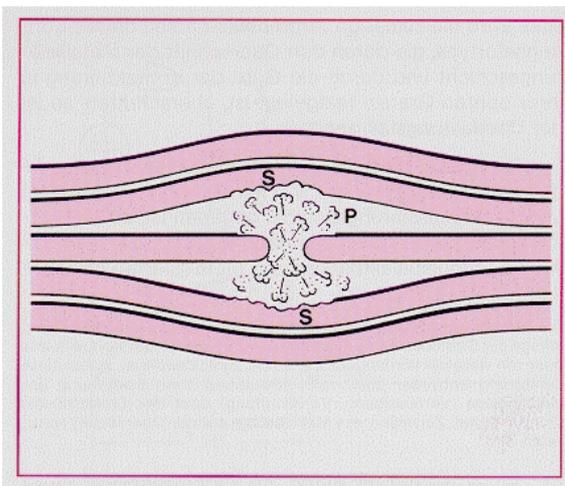


Abb. 12: Entstehung eines Durchschlagkanals beim Ausheilvorgang in einem Wickelkondensator. /6/
P= Plasma des Durchschlagfunken
S= Sekundärschaden

“Formieren” bezeichnet. Der Kondensator ist nach dem Formieren funktionsfähig.

Der Prozeß der Ausheilung oder Selbstheilung wird durch einen elektrischen Durchschlag eingeleitet, der in ca. 10^{-8} s abläuft. Wie die Abbildung zeigt, bildet sich ein Durchschlagskanal aus, in dem ein hochkomprimiertes Plasma herausdrängt und die Dielektrikumschichten auseinander drückt. In dem sich ausbreitenden Plasma setzt sich die Entladung über die Beläge fort. Es treten Temperaturen von schätzungsweise 6000K auf. Dabei bilden sich isolierende Höfe um die ursprünglich vorhandene Fehlstelle, wie die folgende Abbildung zeigt.

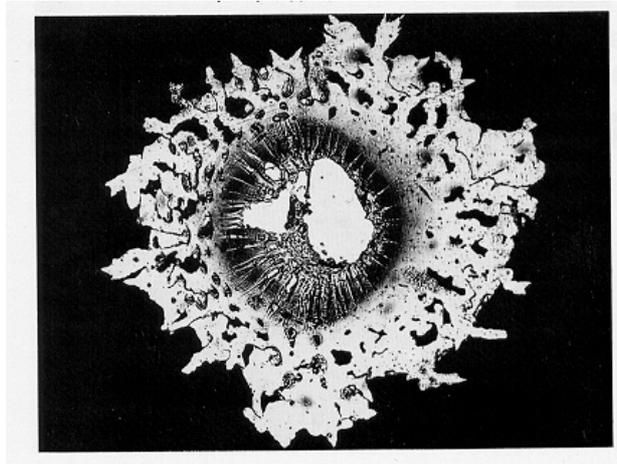


Abb. 13: Isolierhof nach dem Ausheilvorgang [7/]

Der Ausheilvorgang dauert einige Mikrosekunden. Die Entladung des Plasmas erlischt bereits, ehe ein größerer Spannungsabfall eintritt. Eine schnelle Löschung des Plasmas ist notwendig, um Folgeschäden an einer über der Fehlstelle liegenden Dielektrikumschicht zu vermeiden. Der Druck zwischen den Lagen darf nicht zu groß sein, um eine rasche Ausdehnung des Plasmas vom Durchschlagskanal aus zu ermöglichen. Der einwandfreie Ablauf des Ausheilvorganges hängt von der Dicke der Metallisierung, von der chemischen Zusammensetzung des Gases, von der Resorptionsfähigkeit des Dielektrikums und von der Höhe der angelegten Spannung ab.

Der Vorteil der Ausheilfähigkeit der metallisierten Folienkondensatoren wird beim Herstellungsprozeß ausgenutzt, um Fehlstellen sicher zu beseitigen. Unter Betriebsbedingungen sollte dieser Vorgang nicht stattfinden.

Metallfolien dagegen verschweißen nach einem elektrischen Durchschlag. Ein Metallfolien-Kondensator ist nach einem Durchschlag unbrauchbar.

d) Gehäuseformen

Folienkondensatoren werden in der Becher-Verguß-Technologie gefertigt. Ein typischer Aufbau eines Wickelkondensators in einem Bechergehäuse ist in der Abbildung 14 dargestellt. Die Vorteile der in Becher gefaßten Wickel sind:

- ! die Umhüllung schützt den Kondensator vor übermäßiger Hitze während des Lötprozesses,
- ! Umhüllung und Verguß gewährleisten eine hohe Feuchtbeständigkeit,
- ! das Gießharz umschließt den Kondensatorkörper drucklos und ermöglicht ein ausgezeichnetes Regenerierverhalten,
- ! die ganzseitigen Anschlußbleche sind vom aktiven Teil des Kondensators mechanisch entkoppelt und gewährleisten eine spannungsfreie Kontaktierung.

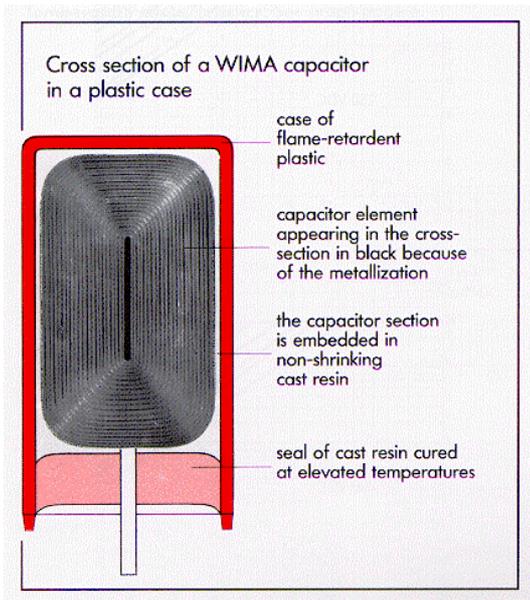


Abb. 14: Aufbau eines Wickelkondensators in einem Bechergehäuse nach /8/

SMD-Bauteile können umpreßt oder ohne Hülle ausgeführt sein. Umpreßte Typen unterliegen beim Umhüllungsprozeß einer starken Druck- und Temperaturbelastung. Der daraus resultierende hohen Lagendruck der Dielektrikumsfolie führt zu einer Verminderung der Ausheilfähigkeit, die zu einer Vorschädigung des Materials führen kann. Das Resultat ist eine erhebliche Reduzierung der Spannungsfestigkeit.

Nicht umhüllte Typen leiden beim Lötprozeß unter der hohen Temperaturbelastung. Polyester beispielsweise weist eine Schmelztemperatur von 260°C auf. Ein weiterer Schwachpunkt ist die hohe Feuchtigkeitsempfindlichkeit. Während des Reinigungsprozesses kann vermehrt Feuchtigkeit eindringen, wodurch die elektrischen Eigenschaften des Kondensators verschlechtert werden.

2.4.1.2 Folien-Materialien und Anwendungsbereiche von Folienkondensatoren

a) Papier

! Bezeichnungen:

Metallfolie - Papier: "P"

Metallisiertes Papier: "MP"

! Eigenschaften:

elektrische Daten siehe Übersichtstabelle

Vorteile: sehr guter Isolator,
niedrige dielektrische Verluste
mittel-große Permittivität: $\epsilon \approx 6$

Nachteile: hygroskopisch
hohe Löcherdichte

! Aufbau:

Verwendung von Spezialpapier: Sulfat- Natronzellulose
 Papierstärke: ca. 10 μ m
 wegen Löcherdichte oft mehrlagige Wicklungen
 zur Verhinderung von Feuchtigkeitsaufnahme: Imprägnierung mit Öl, Wachs, Epoxidharz, etc.

! Verfügbarkeit:

Kapazitätsbereich: 1 nF bis 1 μ F
 Normen für Papier: DIN 41140 ... 41 177
 Normen für Metallpapier: DIN 41 180 ... 41 199
 europ./internat. Norm: IEC 384-14 / EN 132 400

b) Kunststoff**! verwendbare Kunststoffe:**

Polycarbonat (auch: Makroflex)
 Polypropylen
 Polystyrol (auch: Styroflex)
 Polyterephthalat (auch Polyester; andere Handelsnamen: Hostaphan, Mylar)
 Celluloseacetat (auch Lackfolie)

! Bezeichnungen

Metallfolie - Kunststoff: "K"
 Metallisierter Kunststoff: "MK"
 Polycarbonat: KC, MKC
 Polypropylen: KP, MKP
 Polystyrol: KS, MKS
 Polyester: KT, MKT
 Polyphenylen-Sulfid (PPS): KI, MKI
 Lackfilm (Celluloseacetat, Polyurethan): KU, MKU

! Eigenschaften**Polyester-Folie:**

Kondensatoren aus diesem Folienmaterial zeichnen sich durch ihre hohe Spannungs- und Impulsfestigkeit verbunden mit einer hohen Wärmebeständigkeit aus. Die relativ große Dielektrizitätskonstante ϵ ermöglicht eine größere Volumenkapazität. Polyesterfolien-Kondensatoren werden hauptsächlich für Koppel- und Block-Kondensatoren eingesetzt.

Polypropylen-Folie:

Sie zeichnen sich durch hohe Spannungsfestigkeit und einen niedrigen Verlustfaktor aus. Kondensatoren aus diesem Folienmaterial weisen einen negativen Temperaturkoeffizienten aus. Wegen der niedrigeren Dielektrizitätskonstante ist die Volumenkapazität kleiner, d.h. bei gleichem Kapazitätswert ist im Vergleich zu Kondensatoren aus anderen Folienmaterialien eine größere Bauform erforderlich. Hauptanwendungen dieses Kondensatortyps sind Hochstrom-Impulsschaltungen, Converter und Hf-Inverter, Oszillatorschaltungen, Schaltnetzteile, du/di-Begrenzungen und

Energiespeicherung bei elektronischen Zündsystemen.

Polycarbonat-Folie:

Sie zeichnet sich durch eine sehr gute Wärmebeständigkeit und gute Langzeitstabilität aus. Die Dielektrizitätskonstante liegt zwischen den Werten der Polyester- und Polypropylen-Folie. Kondensatoren dieses Typs werden hauptsächlich bei Verstärkerschaltungen, in Filter sowie als Koppel- und Blockkondensator eingesetzt.

Polystyrol-Folie (Styroflex):

Sie besitzt die geringste Feuchtempfindlichkeit und den kleinsten Verlustfaktor im Vergleich zu den oben genannten Folien ferner eine gute Kapazitätskonstanz und einen sehr hohen Isolationswiderstand. Der TK ist negativ. Nachteilig sind die niedrige Einsatztemperatur und die geringe Spannungsfestigkeit der Folie. Der Anwendungsbereich liegt bei Filtern, Hoch-/Tiefpässen und Schwingkreisen.

Polyphenyl-Sulfid /9/:

Es handelt sich um ein neu entwickeltes Folienmaterial, das sich durch einen niedrigen Verlustfaktor (ähnlich Polypropylen), eine hohe Dielektrizitätskonstante (ähnlich Polyester) und vor allem eine unvergleichbar hohe Temperaturbeständigkeit aufweist (bis 140 °C). Die Anwendungen liegen in der Automobiltechnik.

Lackfilm:

Wegen der großen Dielektrizitätskonstanten und den sehr dünnen Lackfilmen (ca 1 µm) haben diese Kondensatortypen ein sehr kleines Volumen. Bemerkenswert ist, daß hier eine Metallfolie mit einer Lackschicht überzogen wird. Trotz der hohen Betriebssicherheit werden diese Typen kaum mehr hergestellt. Der Grund liegt in dem hohen Verlustfaktor und der niedrigen maximalen Betriebstemperatur.

! Überblick über Eigenschaften und Verfügbarkeit verschiedener Folientypen /1/, /4/, /8/, /10/

	Polyester	Polypropylen	Polycarbonat	Polystyrol	Polyphenyl Sulfid	Lackfilm
Permittivitätszahl ϵ *)	3,3	2,2	2,8	2,5	3	4,7
Durchgangswiderstand (M Ω) *)	$>10^4$	$>10^5$	$>10^5$	$>10^6$	$>10^4$	n.a.
Durchschlagsfestigkeit (V/µm) *)	580 V	650 V	535 V	n.a.	470 V	n.a.
Verlustfaktor $\tan\delta$ in 10^{-3} *)	4	0,25	1	0,5	0,6	10
Temperaturkoeffizient *)	$< +100$ ppm	-350 ppm	≈ 0	-100 ppm	≈ 0	n.a.
Temperaturbereich in °C	-55 bis +100	-55 bis +85	-55 bis +100	-40 bis +80	-55 bis +140	-40 bis +70
Verfügbarkeit in nF	1 bis 1000	0,1 bis 1000	0,1 bis 1000	0,01 bis 10	0,1 bis 100	n.a.
Nennspannung in V= in V~	63 - 1000 40 - 250	63 - 1000	63 - 1000 63 - 250	63 - 630 25 - 250	63 - 400	n.a.

*) Angabe bei 25 °C und 1 kHz

Normen: Metallfolie DIN 41379 - 41391
 Metallisierte Folie DIN 44110 - 44116
 IEC 68-2-20, 384-2/6/16
 CECC 30400, 30500, 31200, 32200

Prüfklassen nach IEC: 55/100/21 bis 56

! Sonder Bauformen

Entstör-Kondensatoren /10/

Funkentstörkondensatoren dienen zur Verringerung von Störungen des Funkempfanges, die von elektrischen bzw. elektronischen Anlagen und Geräten erzeugt werden. Man unterscheidet zwei Gruppen von Entstörkondensatoren: X- und Y-Kondensatoren.

X-Kondensatoren werden zwischen zwei stromführende Leiter, also parallel zum Netz geschaltet. Ihr Ausfall durch Kurzschluß kann nicht zu einem gefährlichen elektrischen Schlag führen. Die Kapazität eines X-Kondensators ist nicht begrenzt.

Man unterscheidet wiederum zwei Unterklassen entsprechend der Spitzenspannung, die zusätzlich zur Netzspannung im Netz auftreten kann:

Klasse X1: sie ist für den Einsatz mit hoher Spitzenspannung über $1,2 \text{ kV}_S$ ausgelegt. Die Sicherheitsanforderungen fordern Stabilität bis zu einer Spitzenspannung von 4 kV_S .

Klasse X2: sie kann für normale Anforderungen eingesetzt werden, wo die auftretende Spitzenspannung maximal $1,2 \text{ kV}_S$ beträgt. Bis zu $1,4 \text{ kV}_S$ werden die Sicherheitsanforderungen erfüllt.

Y-Kondensatoren sind Kondensatoren mit begrenzter Kapazität und erhöhter mechanischer und elektrischer Sicherheit für eine Isolierspannung von $250 \text{ V}_{\text{eff}}$. Sie werden zwischen stromführenden Leiter und Schutzleiter (Erde) geschaltet und sollen bei Versagen der Schutzmaßnahmen eines Betriebsmittels eine Gefährdung durch elektrischen Schlag verhindern. Ihre erhöhte elektrische und mechanische Sicherheit soll Kurzschlüsse im Kondensator selbst ausschließen. Die Begrenzung der Kapazität setzt bei Wechselspannungen den durch den Kondensator fließenden Strom herab. Bei Gleichspannung wird der Energieinhalt des Kondensators auf ein ungefährliches Maß begrenzt.

Als Dielektrikum finden Polypropylen, Polyester und Papier Verwendung.

2.4.1.3 Elektrolyt - Wickelkondensatoren

Der klassische Elektrolyt-Kondensator (kurz Elkos genannt) gehört zur Familie der Wickelkondensatoren, während die Elektrolyt-Sinter-Kondensatoren zur Familie der Massekondensatoren zählen.

Herausragende Merkmale im Aufbau eines Elektrolyt-Kondensators sind:

! Die Anode besteht aus einer dünnen Metallfolie, die sog. Anodenfolie

Als Metalle kommen in Frage:

- Aluminium, Tantal:

dieser Typ wird allgemein als Alu-Elko bezeichnet

- Niob, Titan oder Zirkonium

seltener und nur für Spezialanwendungen auch

! Das Dielektrikum bildet das Oxid des Anoden-Materials.

Aluminium-Oxid (Al_2O_3) mit einer Permittivität $\epsilon = 7 \dots 8$

Tantal-Pentoxid (Ta_2O_5) mit einer Permittivität $\epsilon = 25 \dots 27$

! Die Kathode bildet der Elektrolyt, der flüssig, pastös oder auch fest sein kann. Die Ankontaktierung des Elektrolyten erfolgt durch eine weitere Metallfolie, die sog. Kathodenfolie. Flüssige oder pastöse Elektrolyten sind in einem Spezialpapier gebunden.

! Der besondere Aufbau erfordert eine vorgegebene Polung des Elkos.

! Wegen der sehr dünnen Oxidschicht von nur einigen Nanometern Dicke und der relativ hohen Permittivität zeichnen sich alle Elkos durch eine besonders hohe Volumenkapazität aus.

a) Aluminium - Elektrolyt -Kondensatoren

! gepolte Ausführung

dieser Typ ist nur für Gleichspannungen bzw. Gleichspannungen mit überlagerter Wechselspannung mit richtiger Polung verwendbar. Bei Einsatz mit überlagerter Wechselspannung darf die Dauerspannung nicht überschritten werden.

! Aluminium-Anodenfolie

- werkseitig anodische Oxidation (elektrolytische Formierung) liefert Dielektrikum
- Aluminiumoxid hält hohen elektrischen Feldstärken stand (10MV/cm)
- Anodenfolie stellt im Betrieb den Pluspol dar
- Anodenfolie kann aufgeraut werden, wodurch sich die Oberfläche und damit die Kapazität erhöht; eine Erhöhung bis zu einem Faktor 50 ist möglich
- Aufrauung erzeugt tiefe Poren, die im Betrieb durch Nachformierung zuwachsen können; daraus resultiert eine Variation der Kapazität

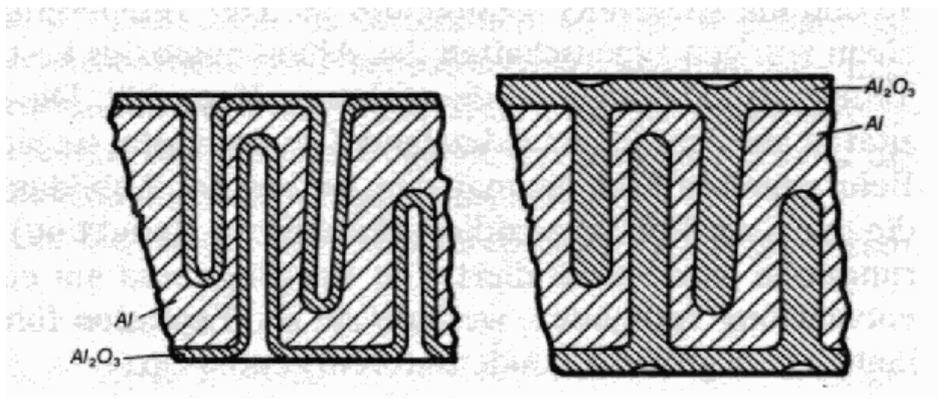


Abb. 15: Verschieden stark oxidierte aufgeraute Anodenfolie. Die Porentiefe kann bis zu 40 μm betragen /1/

! Elektrolyt

- der Elektrolyt bildet die Kathode
- Aufgabe: stabilisiert die Oxidschicht

- **Zusammensetzung:**
komplexe Mischung meist organischer Säuren (Ameisen-, Bernstein-, Bor-, Essig-, Oxal-, Phosphor-, Wein-, Zitronensäure mit Zusätzen von Dimethylacetamid, Dimethylformamid, Glycerin, Glykol, u.s.w.)
- **Forderungen an den Elektrolyt:**
muß chemisch stabil sein, darf Oxidschicht nicht angreifen, muß im Betrieb die Oxidschicht nachformieren können, darf kein freies Gas bilden, muß hohe elektrische Leitfähigkeit im gesamten Temperaturbereich besitzen, soll kleinen TK-Wert aufweisen

! “nasser” (wet) Elko

der freie, flüssige Elektrolyt befindet sich zwischen dem oxidierten Alu-Wickel in einem dicht verschlossenem Gefäß. Wegen der Gefahr des Auslaufens werden derartige Typen heute nicht mehr hergestellt.

! “trockener” (dry) Elko

der flüssige oder pastöse Elektrolyt ist in einem Spezialpapier oder Gewebe gebunden, das auch die Funktion des Abstandhalters zwischen den Wicklungen einnimmt. Vorteil: platzsparenderer Wicklung und einfachere Becherung.

! Kathoden-Folie

- wird auch als Stromzuführungsfolie bezeichnet
- dient zur Ankontaktierung des Elektrolyten
- besitzt eine sehr dünne, natürliche Oxidschicht (ca. 8 nm), die durch die oxidierende Wirkung des Elektrolyten zustandekommt; sie wird während des Betriebes reduziert .

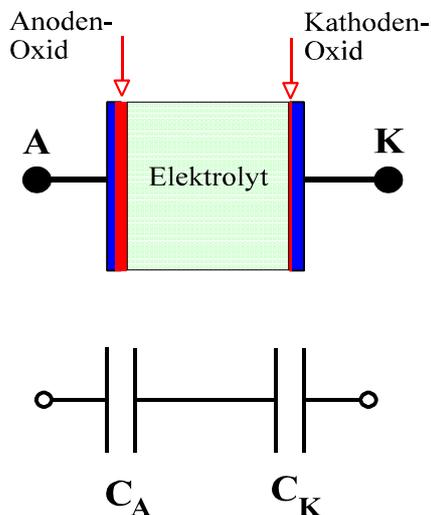


Abb. 16: Ersatzschaltbild einer Elektrolyt-Kondensators; die Oxide auf der Anoden- und der Kathodenfolie bilden zwei Kapazitäten C_A und C_K , von denen C_K die größere Kapazität darstellt.



Merke:

C_K viel größer als C_A ! Aufgrund der Serienschaltung der zwei Kapazitäten dominiert letztlich die kleinere Kapazität C_A ! Bei Falschpolung oder häufigem kurzschlußartigem Entladen kann die kathodenseitige Oxidschicht dicker werden, wodurch C_K kleiner wird. Die Gesamtkapazität des Elkos nimmt dann ab. Im Extremfall kann die Gesamtkapazität der Serienschaltung $\frac{1}{2}C_A$ werden.

! Reststrom

- bei erstmaligem Betrieb oder nach längerer Lagerung fließt ein großer Reststrom, der bei richtiger Polung des Elko rasch abnimmt (sog. Abnahmereststrom)
- Ursache:
Ionenstrom über gestörte, nicht formierte Fehlstellen in der Oxidschicht; bei Betrieb heilen die Fehlstellen durch die Fähigkeit des Elektrolyten zur anodische Oxidation aus. Der Elko ist also selbstheilend.
- Leckstrom bei Anliegen einer Gleichspannung im Dauerbetrieb:
Er ist zur Aufrechterhaltung der Oxidschicht erforderlich; er ist spannungs-, temperatur- und zeitabhängig. Der Richtwert errechnet sich wie folgt:

$$I = 0,02 \cdot C \cdot U_N + 3 \mu A$$

! Falschpolung

bei Falschpolung tritt Reduktion des Anodenoxids ein, das Oxid der Stromzuführungsfolie wächst, der Strom steigt stark an, der Kondensator wird warm; wegen der oft unvermeidlichen Gasentwicklung kann der Elko explodieren. Große Elkos besitzen Ventile. Alu-Elkos tolerieren im Gegensatz zu Tantal-Elkos eine kurzzeitige Falschpolung.

! Bipolarer Elko

dieser Typ ist ungepolt und kann daher mit Gleichspannungen beliebiger Polung oder auch mit Wechselspannungen betrieben werden. Bei bipolaren Elkos sind beide Folien werkseitig formiert.

Beim Einsatz mit Wechselspannungen muß diese wegen der Eigenerwärmung des Kondensators erheblich unter der Nennspannung liegen.

Ein ungepoltter Elko weist bei gleicher Nennkapazität/Nennspannung gegenüber einem gepolten Elko bei gleichem Aufbau ein bis zu doppeltes Volumen auf. Der Reststrom kann ebenfalls bis zu einem Faktor 2 größer sein.

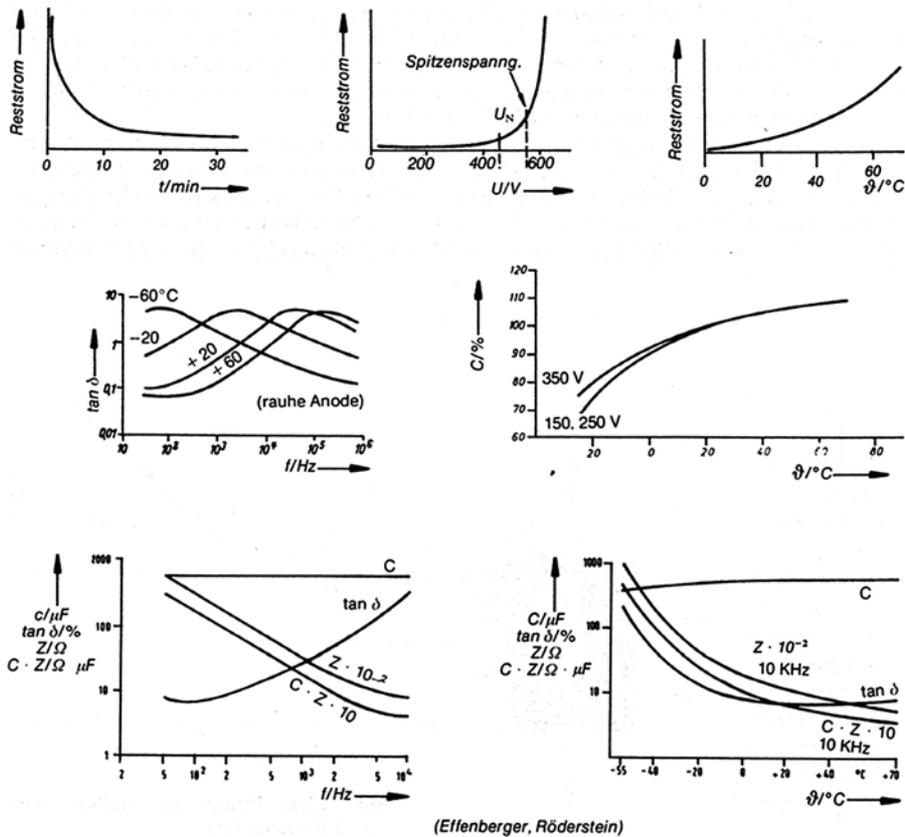


Abb. 17: Wichtige Betriebsdaten eines Aluminium Elkos nach /1/

! Wichtige Betriebsgrößen

- Wechsellspannungskapazität:
Sie entspricht normalerweise der Nennkapazität und wird bei einer Meßspannung von $\leq 0,5V_{\text{eff}}$ und einer Meßfrequenz von 50 Hz ermittelt. Diese so ermittelte Wechsellspannungskapazität ist wichtig beim Einsatz zur Glättung und Kopplung bzw. zum Ableiten von NF- und HF-Strömen.
- Gleichspannungskapazität:
Sie ist bei Entladeschaltungen (Einhaltung von Zeitbedingungen) wichtig. Sie ergibt sich aus der Ladungsmenge, die bei der Nennspannung gespeichert ist. Die Gleichspannungskapazität beträgt etwa das 1,1- bis 1,4-fache der Wechsellspannungskapazität.
- Temperaturabhängigkeit der Kapazität
Der Temperaturkoeffizient ist positiv und wird durch den Elektrolyten bestimmt. Bei hohen Temperaturen sinkt die Viskosität des Elektrolyten, damit steigt seine Leitfähigkeit an.

$$TK \sim +0,2 \dots 0,3 \text{ \%}/K$$

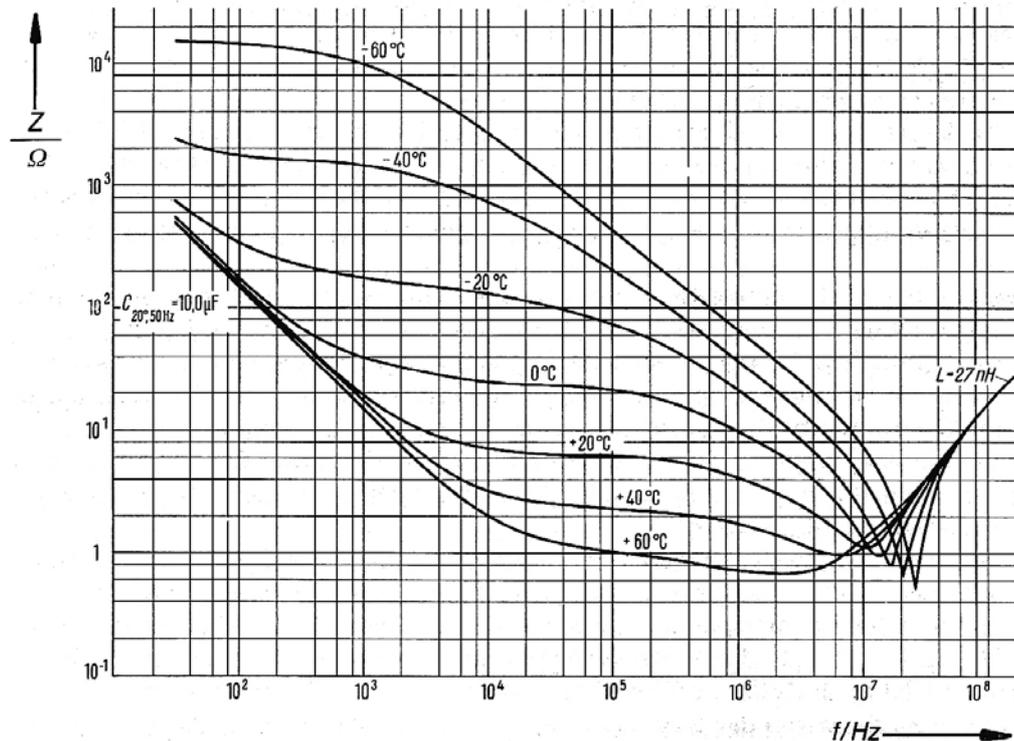


Abb. 18: Scheinwiderstand eines Alu Elkos mit aufgerauhter Anodenfolie als Funktion der Frequenz nach /1/

- Kapazitätstoleranz

Die zulässige Abweichung der Kapazität gibt an, wie weit die Kapazität des Kondensators bei 20°C von der Nennkapazität bei Anlieferung abweichen darf. Die Toleranz beträgt im allgemeinen:

für $C \leq 4,7 \mu\text{F}$: +75% ... - 10%

für $C \geq 4,7 \mu\text{F}$: +50% ... - 10%

- Scheinwiderstand

Der Scheinwiderstand ergibt sich aus dem Ersatzschaltbild des Elkos, das aus dem allgemeinen Ersatzschaltbild für einen Kondensator hervorgeht (s. Abb. 5). Die durch die Aufrauung der Anodenfolie entstandenen Poren prägen wesentlich den Frequenz- und Temperaturgang des Scheinwiderstandes Z . Die über den Elektrolyten angekoppelten Porenkapazitäten können bei hohen Frequenzen mit der aufgeprägten Wechselspannung nicht in vollem Umfang mitschwingen, so daß sich der in der Abbildung dargestellte Verlauf ergibt.

Die Temperaturabhängigkeit des Elektrolyten spiegelt sich ebenfalls im Scheinwiderstand.

! Elkos mit festem Elektrolyten

Die moderne Technologie ermöglicht die Herstellung von Aluminium Elkos mit festem Elektrolyten. Auf einem Glasfasergewebe ist halbleitendes Mangandioxid fixiert, das den

Elektrolyten bildet. Diese Typen heißen SAL-Kondensatoren (SAL = Solid Aluminium). Die Bauformen lassen sich mit Tantal-Elkos vergleichen. Sie zeichnen sich durch eine extrem lange Lebensdauer und einen breiten Temperaturbereich (-55°C bis $+125^{\circ}\text{C}$) aus.



Abb. 19: Bauform eines Alu-Elko mit festem Elektrolyt /10/

! Bauformen

Als Bauform herrschen die radiale Bauform und die Becherform vor. Es sind aber neuerdings auch SMD-Bauteile erhältlich.



Abb. 20: Typische Bauformen von Alu Elkos /4/

b) Tantal-Elektrolyt-Kondensatoren

! Allgemeines

Tantal als Anodenmaterial besitzt gegenüber Aluminium viele Vorteile, wie beispielsweise die längere Lebensdauer, die größere Korrosionsfestigkeit, den wesentlich niedrigeren Leckstrom, die hohe Konstanz der Kapazität und des Verlustfaktors über einen weiten Temperaturbereich, die wesentliche höhere Volumenkapazität und die Lagerfähigkeit für unbegrenzte Zeit ohne Verlust der Anfangseigenschaften.

Der Tantal-Kondensator ist als Wickelkondensator und als Massekondensator auf dem Markt. In beiden Fällen handelt es sich um gepolte Kondensatoren, die sehr empfindlich auf Falschpolung reagieren.

! Tantal-Wickel-Elektrolyt-Kondensator

Das Ausgangsprodukt ist entweder eine aufgerauhte Tantal-Folie oder gesintertes Tantalpulver. Tantal läßt sich elektrolytisch oxidieren. Als Elektrolyt kann wegen der hohen Korrosionsfestigkeit eine aggressive Säure verwendet werden, i.A. Schwefelsäure, die auch eine hervorragende Leitfähigkeit besitzt.

Wegen des teuren Herstellungsverfahrens (die Oxidationstemperaturen liegen sehr hoch) werden Wickelkondensatoren nur selten eingesetzt. Haupteinsatzgebiet ist die Raumfahrttechnik, in der die hohen Sicherheitsanforderungen nur von Ta-Wickelkondensatoren erreicht werden.

Nennspannungen bis zu $U_N = 125V$

Nennkapazitäten $C \leq 560 \mu F$

2.4.2 Massekondensatoren

Zur Familie der Massekondensatoren zählen die Keramik-, Tantal-Sinter-, und Glaskondensatoren. Während Glaskondensatoren nur bei Spezialanwendungen wie beispielsweise in der Energietechnik für Hochspannungsanwendungen zum Einsatz kommt, spielen Keramik- und Tantal-Sinter-Kondensatoren eine große Rolle.

2.4.2.1 Keramik-Kondensatoren

In dieser Gruppe finden sich die sog. Keramik-Einschicht-Kondensatoren. Sie bestehen im wesentlichen aus einem dünnen Keramikplättchen. Der Grundkörper mit einer Stärke von $>0,1$ mm wird durch Pressen geformt und dann bei Temperaturen von 1200 °C bis 1400 °C gesintert. Die Elektroden bestehen entweder aus Einbrennsilber oder aus beidseitig aufgetragenen Kupferbelägen. Die im Tauchverfahren aufgetragene Epoxyharz-Umhüllung verleiht dem Kondensator große mechanische Festigkeit, einen guten Feuchteschutz und gute Resistenz gegen Lösungsmittel.

Der klassische Keramik-Kondensator bestand aus einem Keramikröhrchen. Durch den Zwang zur Miniaturisierung haben sich heute Scheibenform, Tropfenform oder SMD-Bauteile durchgesetzt.

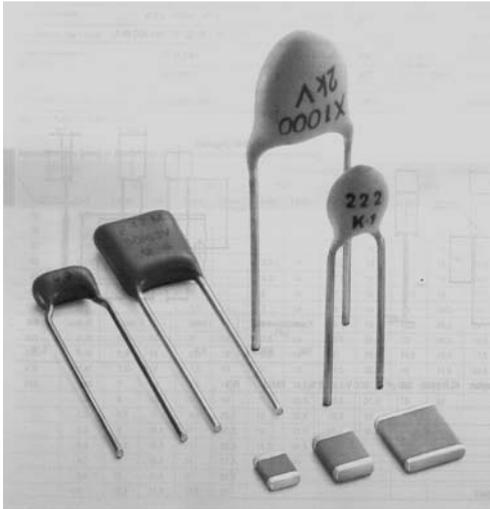


Abb. 21: Typische Bauformen von
Keramikkondensatoren nach /4/

Je nach chemischer Zusammensetzung der dielektrischen Keramik werden die Keramik-Kondensatoren in drei Typen unterteilt, die in DIN 41920 bzw. IEC384-9 Nr. 108 und 187 festgehalten sind: Typ-1-, Typ-2- und Typ-3 oder Sperrschichtkondensatoren.

a) Typ - 1 -Kondensatoren

Das Keramik-Dielektrikum besteht hauptsächlich aus Titandioxyd mit einer Permittivitätszahl ϵ zwischen 13 und 470 je Stoffzusammensetzung. Dieser Typ zeichnet sich aus durch folgende Eigenschaften:

- linear von der Temperatur abhängige Kapazitätsänderung
- konstanter, kleiner Temperaturkoeffizient von ca ± 30 ppm/K
- keine nennenswerte Alterung
- Kapazität und Verlustfaktor sind spannungsunabhängig
- Verlustfaktor beträgt ca. $1 \cdot 10^{-3}$
- große Konstanz der Kapazität ermöglicht enge Toleranzen
- sehr hoher Isolationswiderstand, geringe elektrische Verluste

Typ-1-Kondensatoren werden zur Temperaturkompensation in Schwingkreisen und Filtern, Meßverstärkern, Zeitgliedern und zur Kopplung/Entkopplung und Siebung in HF-Kreisen verwendet.

b) Typ - 2 - Kondensatoren

Das Keramik-Dielektrikum weist einem hohen Anteil an Barium-Titanat auf, das ferroelektrische Eigenschaften hat. Die Permittivitätszahl liegt sehr hoch zwischen 700 und 15000. Dieser Typ zeichnet sich durch folgende Merkmale aus:

- nichtlinearen Abhängigkeit der Kapazität von der Temperatur und der Spannung
- großer Temperaturkoeffizient im Bereich einige %/K
- erhebliche Alterung, wesentlich geringere zeitliche und elektrische Konstanz der Kapazität im Vergleich zum Typ - 1
- Verlustfaktor ca. $3 \cdot 10^{-2}$
- große Kapazität bei kleinem Volumen

- hoher Isolationswiderstand bei Gleichstrom

Die Anwendungen liegen bei Kopplung/Entkopplung, wenn höhere Kapazitäten verlangt werden, aber eine große Kapazitätsstabilität nicht erforderlich ist, z.B. In NF-Filtern, Demodulatoren etc.

c) Typ - 3 - Kondensatoren, Sperrschichtkondensatoren

Als Dielektrikum findet ferroelektrisches halbleitendes Barium- oder Strontium-Titanat Anwendung. Diese Materialien besitzen eine sehr hohe Permittivität zwischen 10^4 und 10^5 . Dieser Typ besitzt eine noch größere nichtlineare Kapazitätsabhängigkeit von der Temperatur und der Spannung als Typ - 2. Bei großer Frequenzabhängigkeit ist auch eine relativ niedriger Isolationswiderstand zu vermerken. Die Anwendungen liegen ähnlich wie bei Typ - 2 im Bedarf sehr hoher Kapazitätswerte bei kleinem Volumen und niedrigen Spannungen. Dieser Typ ist sehr induktivitäts-arm. Es gilt die Faustregel, daß bei vergleichbaren Abmessungen die Resonanzfrequenz umso höher liegt je größer die Permittivitätszahl ist.

d) Kennzeichnung

Die Grundfarbe ist hellbraun, bei Typ - 3 grün. Der Kapazitätswert und die Toleranz werden entsprechend dem international anerkannten MIL-Code aufgedruckt, bei Kopplungs- und Funkentstörkondensatoren nach IEC-Code. Bei Typ - 3 - Kondensatoren erfolgt kein Toleranzaufdruck. MIL-Code für die Kapazität in pF: 3 Ziffern

die ersten 2 Ziffern = Wert, 3. Ziffer = Multiplikator in Zehnerpotenzen wie folgt:

1 bis 7 = Anzahl der Nullen, 8 = $\times 10^{-2}$, 9 = $\times 10^{-3}$

Kapazität	IEC	MIL	Toleranz	Code
0,33pF	p33	338	+0,25 pF	C
1 pF	1p0	109	$\pm 0,5$ pF $\pm 1,0$ pF	D F
10 pF	10p	10	$\pm 2\%$ $\pm 5\%$	G J
1 nF	1n0	102	$\pm 10\%$ $\pm 20\%$	K M
1,5 nF	1n5	152	-20, +50%	S
1 μ F	1 μ 0	105	-20, +80%	Z

e) Verfügbare Kapazitätsbereiche

- Typ - 1: 1 pF bis 1nF, 500V bis 15 kV
- Typ - 2: 50 pF bis 50 nF, 100 V bis 6 kV
- Typ - 3: 1 nF bis 500 nF, 25 V bis 50 V

2.4.2.2 Tantal - Sinter - Kondensatoren

! Aufbau eines Tantal-Masse-Kondensators

Durch Pressen und Sinterung von Tantalpulver im Hochvakuum bei Temperaturen über 1500°C erhält man einen porösen Sinterkörper mit großer Porosität. Pro Kubikzentimeter Sinterkörper ergibt sich eine Oberfläche von 1500 cm^2 . Der Sinterkörper stellt die Anode des Kondensators dar. Da sich in den Poren nur sehr dünne Oxidschichten ($\sim 100\text{nm}$) aufwachsen lassen, sind Sinterkondensatoren nur für relativ niedrige Spannungen ($\leq 63\text{V}$) herstellbar.

Die Gegenelektrode wird durch Braunstein (Mangandioxid) gebildet. Der poröse Sinterkörper wird mit einer wässrigen Mangan-(II)-Nitrat-Lösung getränkt, das anschließend in einem thermischen Prozeß zu Mangandioxid zersetzt wird. Der Aufbau ist in der folgenden Abbildung zu sehen:

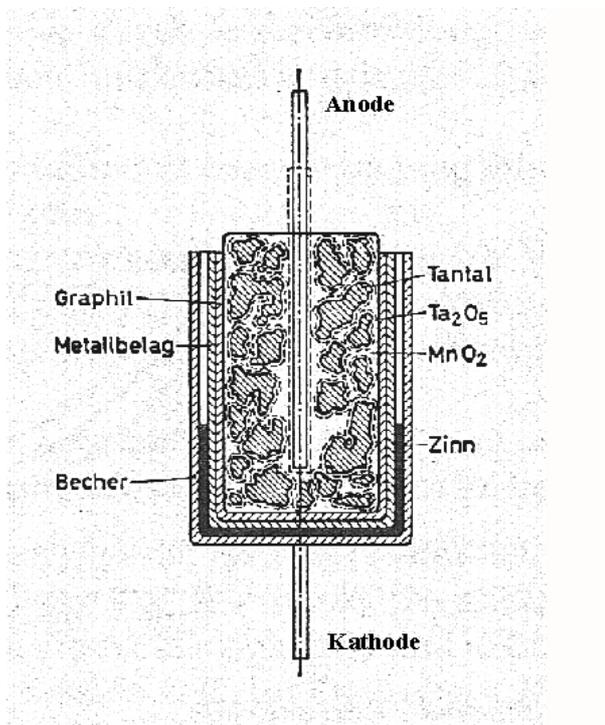


Abb. 22: Querschnitt durch einen Tantal-Sinter-Kondensator /1/

Braunstein weist halbleitende Eigenschaften mit n-Leitung auf. Da Braunstein eine hohe Leitfähigkeit besitzt, sind der Serienwiderstand und der Verlustwinkel klein. Die in der Abbildung dargestellte Graphitschicht ist wegen der Sprödigkeit des Braunsteins erforderlich.

! Kennzeichnung und Bauformen

Übliche Kennzeichnungen der Bauelemente sind in der folgenden Abbildung dargelegt:

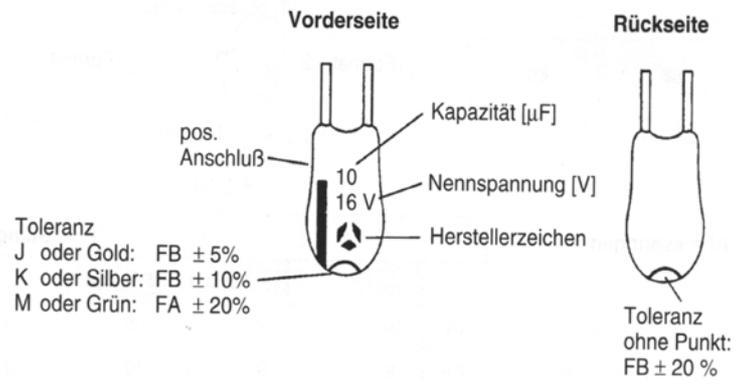


Abb. 23: Kennzeichnungen von Vorder- und Rückseite eines Tantal-Sinter-Kondensators nach /4/

Häufige Formen sind die radiale, axiale und Tropfenform; ebenso finden immer häufiger auch SMD Bauteile Anwendung.

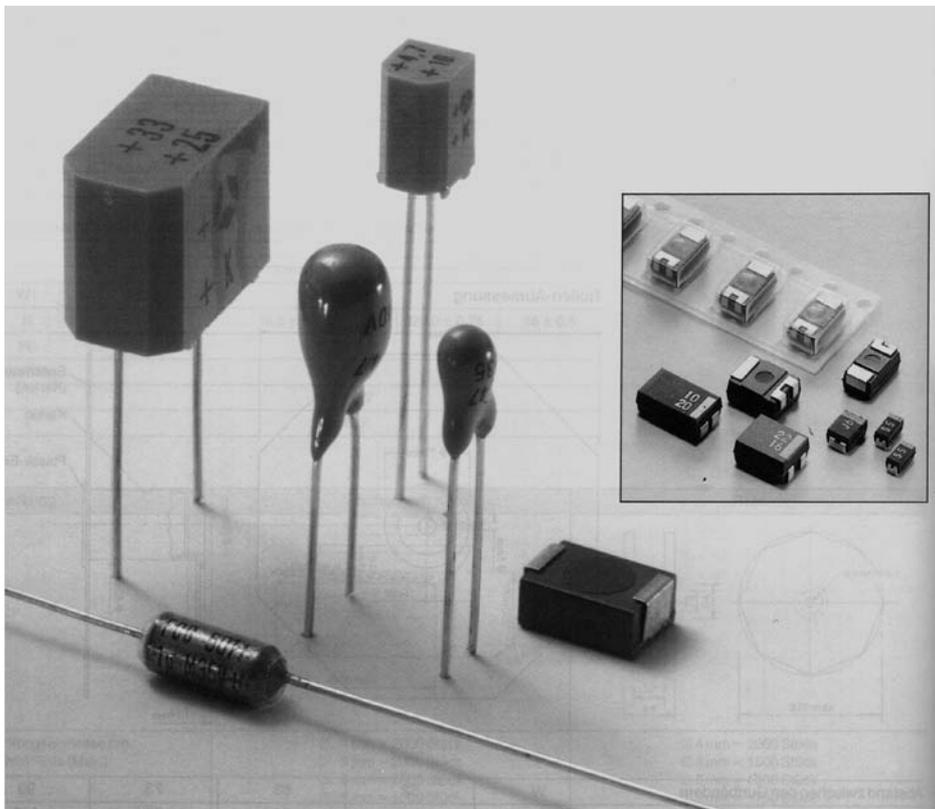


Abb. 24: Gehäuseformen von Tantal-Sinter-Kondensatoren nach /4/

! Verfügbare Kapazitäten und Temperaturbereiche

0,1 μF bis 1 mF, 3 V bis 50 V

- 55°C bis +85°C, Toleranz $\pm 20\%$ für allgemeine Anwendungen

- 55°C bis +125°C, Toleranz $\pm 10\%$ für professionelle Anwendungen

2.4.2.3 Glas - Kondensatoren

Glas als Dielektrikum wird nur für Spezialanwendungen hergestellt, z.B. im Trimmer- und Hochspannungskondensatoren (bis 200 kV). Die Permittivität liegt zwischen 4 und 8, bei Quarz ist $\epsilon \sim 4$ der Isolationswiderstand ist sehr hoch (10^5 bis $10^{10} \text{ M}\Omega$) und der Verlustfaktor klein $\sim 2 \cdot 10^{-4}$. Herausragendes Merkmal ist die hohe Durchschlagfestigkeit, die bei einer elektrischen Feldstärke von ca. 400 kV/cm liegt.

2.4.3 Schichtkondensatoren

Zur Familie der Schichtkondensatoren zählen als wichtigste Vertreter die Keramik-Mehrschichtkondensatoren. Glimmer-Kondensatoren kommen nur für Spezialanwendungen in Betracht. Die Dick- und Dünnschicht-Kondensatoren werden mit Mitteln der Hybrid-Technologie bzw. der Halbleitertechnologie in einem zu anderen Bauteilen kompatiblen Prozeß hergestellt und sind nicht Gegenstand der Betrachtung diskreter Bauelemente.

! Keramik-Vielschicht-Kondensatoren

Die Vielschicht-Kondensatoren bestehen aus einem hochfesten, geschichteten Keramikblock. Weiche, gummiartig, flexible Keramikfolien einer Stärke von ca. 25 μm werden mittels Siebdruck mit einer dünnen Metallschicht (ca. 5 μm) metallisiert. Die einzelnen Folien werden anschließend in vielen Lagen übereinander geschichtet, gepreßt und gesintert. Daraus resultiert ein monolithischer stabiler Block, der an den Stirnseiten durch eine zusätzliche Metallisierung mit anschließenden Einbrennprozeß kontaktiert wird. Durch Abtragen der Elektroden lassen sich die Kondensatoren auf 1% Genauigkeit abgleichen.

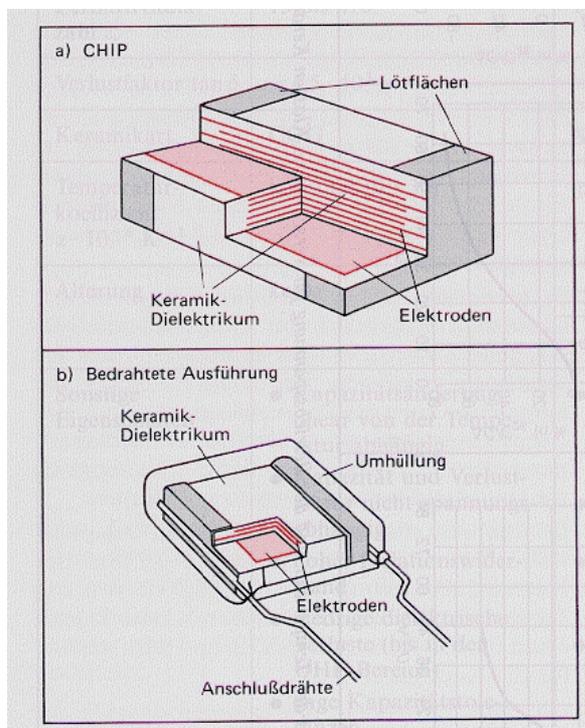


Abb. 25: Aufbau eines Keramik-Vielschicht-Kondensators

a) in Chip-Form b) verdrahtete Ausführung nach /11/

Die Vielschicht-Kondensatoren haben eine lange Lebensdauer und eine sehr geringe Selbstinduktion, so daß Anwendungen bis in den GHz-Bereich möglich sind.

! Glimmer-Kondensatoren

Als Dielektrikum für Glimmer-Kondensatoren wird i.a. Kaliglimmer ausgewählt, der von Natur her Schichtstruktur aufweist. Eine sorgfältige Auswahl des Naturproduktes sorgt für einschlußfreie Glimmerschichten, die in dünne Plättchen gespalten werden. Die Plättchen werden metallisiert, gestapelt, gesintert und die Beläge miteinander verbunden. Abschließend erfährt der Stapel eine gegen Umgebungseinflüsse schützende Hülle.

Glimmerschichten zeichnen sich durch eine hervorragende Wärmebeständigkeit (bis zu 1000°C) und chemische Resistenz aus. Weitere Daten:

- Permittivitätszahl ϵ im Bereich zwischen 6,5 und 8
- Verlustfaktor: ca 10^{-4}
- Durchschlagfestigkeit: 70 kV/mm
- sehr alterungsbeständig, Kapazitätskonstanz 2‰
- Temperaturkoeffizient: 10 bis 40 ppm/K
- zulässiger Temperaturbereich: -55°C bis 150°C

Anwendungen: Kondensatoren für Meßzwecke, für hohe Frequenzen, hohe Spannungen, Hochspannungsimpulse und hohe Umgebungstemperaturen.

2.4.4 Sonder Bauformen

Vakuum-, Luft- und Preßgas-Kondensatoren /1/

Vakuum ist ein nahes verlustfreies Dielektrikum. Verluste ergeben sich fast nur durch die endliche Isolation der Durchführungen. Wegen der relativen Dielektrizitätskonstanten $\epsilon_r = 1$ besitzen Vakuumkondensatoren ein großes Volumen pro Kapazitätseinheit.

Gaskondensatoren weisen ebenfalls äußerst geringe Verluste auf. Die Durchschlagfestigkeit hängt von der Gasart und dem Gasdruck ab. Die Durchschlagfestigkeit steigt mit steigendem Gasdruck. Durch entsprechende Zusätze kann die Durchschlagfestigkeit nahezu verdoppelt werden.

Genannte Kondensatoren werden in seltenen Fällen wegen ihrer äußerst geringen Verluste als Normal- und HF-Kondensatoren verwendet. Preßgas-Kondensatoren können bei sehr hohen Gasdrücken (10^4 hPa) auch als Energiespeicher verwendet werden.

Kondensatoren mit flüssigen Dielektrikum, z.B. Öl.

2.4.5 Kondensatoren mit variabler Kapazität

Dreh- und Trimmkondensatoren /2/

Drehkondensatoren bestehen in der Regel aus einem Stapel feststehender Platten, auch Stator genannt,

und auf einer Achse drehbar montierter Platten, sogenannter Rotor, die kammartige ineinandergreifen. Das Dielektrikum ist i.A. Luft. Die Kapazität ist eine Funktion des Drehwinkels α . Nach dem Querschnitt der Platten richtet sich der funktionale Verlauf der Kapazität. Gebräuchliche Plattenquerschnitte liefern lineare, logarithmische, wellenlängenlineare oder frequenzlineare Kapazitätsverläufe. Die folgende Abbildung zeigt typische Plattenquerschnitte von Drehkondensatoren.

Differential-Drehkondensator

Er ist eine Spezialausführung von Drehkondensatoren. Der Rotor bewegt sich zwischen zwei sich gegenüberstehenden Statoren. In derartiger Anordnung wird das Bauelement als kapazitiver Spannungsteiler eingesetzt.

Trimmkondensatoren

Sogenannte Trimmer können als Scheiben-, Rohr- oder Draht-Trimmer ausgelegt sein. Sie dienen beispielsweise zum Abgleich von Schwingkreisen und werden nur einmal oder nur sehr selten verstellt. Manche Typen können gegen ungewollte Verstellungen gesichert werden. Trimmkondensatoren werden immer häufiger durch Varicap-Dioden ersetzt.

2.4.6 Neue Entwicklungen

In der Fachliteratur wird ständig von Verbesserungen der bekannten Kondensatorfamilien berichtet. Die Verbesserungen zielen auf eine Erhöhung der Impulsfestigkeit /12/, höhere Zuverlässigkeit /13/, niedrigere Serienwiderstände und höhere Kapazitäten pro Volumeneinheit. Selten finden sich nur wirkliche strukturelle Neuerungen wie der Sikh aus makroporösem Silizium /14/.

Seit einigen Jahren wendet sich die Silizium-Technologie porösem Silizium zu, das besondere optische Eigenschaften aufweist. Man kennt heute mikroporöses Silizium, das eine außer ordentlich große Oberfläche pro Volumen besitzt. In der Literatur werden Werte von $1000 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ angegeben. Obwohl derartig große Oberflächen pro Volumen geradezu ideal für die Fertigung wären, lassen sich jedoch wegen der zu kleinen Poren keine Kondensatoren herstellen. Auch sogenanntes mittelporöses Silizium ($100 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$) eignet sich wenig für die Kondensatoranwendung, da auch hier sich in den kleinen Poren keine dielektrische Schicht aufbringen läßt und außerdem die Leitfähigkeit des Substrates zu gering ist, was einen zu hohen Serienwiderstand bedeuten würde.

Makroporöses Silizium mit einer Oberfläche pro Volumen von $1 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ scheint ein neues, zukunfts-trächtiges Material für Kondensatoren zu sein. In schwach n-leitendes Silizium werden makroporöse Strukturen geätzt. Während des Ätzvorganges muß die Siliziumscheibe von der Rückseite her beleuchtet werden. Die Siliziumoberfläche wird lithographisch strukturiert und angeätzt. Ausgehend von den Ätzgruben bilden sich während des Ätzvorganges tiefe Poren, die eine geordnete, rechtwinklig ausgerichtete Wabenstruktur aufweisen. Sie haben am Ende des Prozesses einen Durchmesser von $2 \mu\text{m}$ und eine Tiefe von ca. $200 \mu\text{m}$. Die Oberfläche des Siliziums hat sich um etwa den Faktor 85 vergrößert.

Mit von der Produktion von Halbleiterbauelementen her bekannten Prozessen wird auf elektrochemischem Wege die Oberfläche weiter vergrößert. Zur Steigerung der Leitfähigkeit der Trennwände wird das Silizium-Substrat mit Phosphor-Silikat-Glas (PSG-Prozeß) dotiert. Anschließend wird das sog. ONO-Dielektrikum in die Poren eingebracht (ONO: Oxide - Nitride - Oxide), das aus der

Speicherentwicklung für die DRAM-Herstellung bekannt ist. Die dielektrische Schicht ist etwa 30 nm dick.

Es folgen noch Arbeitsschritte für die Herstellung der zweiten Elektrode und der Kontaktierung des Kondensators.

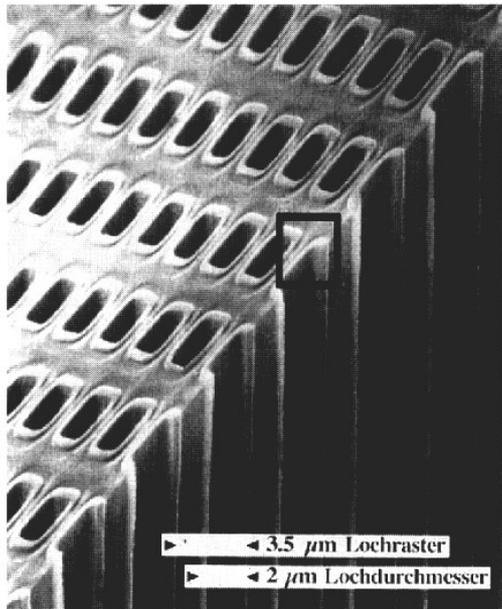


Abb. 26: Wabenstruktur im Silizium nach elektrochemischem Ätzenprozess /14/

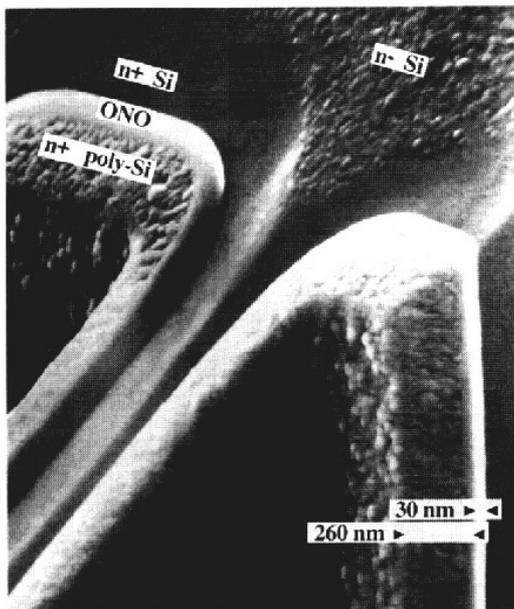


Abb. 27: 1000-fache Vergrößerung zeigt den Aufbau des ONO-Dielektrikums /14/

Die herausragenden Merkmale von Silizium-Kondensatoren sind:

- * relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r beträgt ca. 6
- * spezifische Volumenkapazität beträgt in der derzeitigen Entwicklungsphase $4 \mu\text{F}/\text{mm}^3$ und läßt

sich nach Angaben der Entwickler wahrscheinlich bis $12 \mu\text{F}/\text{mm}^3$ steigern; im Vergleich dazu weisen Alu-Elkos einen Wert von $8 \mu\text{F}/\text{mm}^3$ und Ta-Elko einen Wert von $5 \mu\text{F}/\text{mm}^3$ auf; alle andere Kondensatoren wie Keramik- und Kunststoff-Kondensatoren weisen einen um Größenordnungen kleineren Wert auf

- * die Kapazitätskonstanz in Abhängigkeit von der Spannung, der Temperatur, der Frequenz und der Zeit ist sehr gering und damit wesentlich kleiner als bei den herkömmlichen Kondensatoren aller Familien
- * Verträglichkeit von hohen Temperaturen (bis $200 \text{ }^\circ\text{C}$); beim Löten sind keine Temperatureinschränkungen zu beachten
- * wegen der miniaturisierten Bauweise Einsatz bis zu hohen Frequenzen möglich ($f_r = 15 \text{ MHz}$)
- * hoher Isolationswiderstand von $10^6 \text{ M}\Omega$
- * besteht aus keinen gefährlichen oder leicht entflammaren Materialien
- * läßt sich in modernen Flat-Package-Technologien integrieren (z.B. MCM, OB oder Chip-Karten) ohne zusätzliche Bond-Technik

2.4.7 Lernfragen

- a) Nennen Sie 3 Familien von Kondensatortypen und geben sie jeweils einen typischen Vertreter an.
- b) Welcher Kondensator-Typ muß gepolt werden und wozu ist sie erforderlich? Welches Dielektrikum bestimmt die Kapazität?
- c) Was ist ein Keramik Typ-1-Kondensator?
- d) Worin unterscheidet sich der Aufbau von Wickelkondensatoren mit der Bezeichnung von Typ MK... von K...? Worin liegen die Vorteile des Typs MK...?
- e) Skizzieren Sie schematisch den Aufbau eines Aluminium-Elektrolyt-Kondensators.
- f) Wozu ist der Elektrolyt erforderlich, und welche Größen legen die Kapazität fest, und welches Material bildet das Dielektrikum?
- g) Warum ist bei einem Elektrolytkondensator auf richtige Polung zu achten? Was passiert bei Falschpolung?
- h) Ein Elektrolytkondensator wird öfter kurzschlußartig entladen. Warum beobachtet man eine Abnahme der Kapazität?
- i) Worin liegen die Vorteile von Ta-Elkos?
- j) Welche Gefahren ergeben sich in einem Wickelkondensator bei Gasblasen zwischen den Wicklungen?
- k) Bei den Dielektrika der Kunststoff-Kondensatoren unterscheidet man und Stoffe. Die ersten Stoffgruppe mit dem typischen Vertreter weist eine Dielektrizitätskonstante, die zweite Stoffgruppe mit als typischen Vertreter weist eine Dielektrizitätskonstante auf. Lädt man Kunststoff-

Kondensatoren auf, so stellt man nach vielen Zeitkonstanten einen erheblich höheren Ladestrom fest als man nach der idealen Ladeformel erwarten würde. Man nennt dieses Phänomen Nach einer kurzschlußartigen Entladung des Kondensators können an den offenen Kontakten nach einiger Zeit erhebliche Spannungswerte in Erscheinung treten. Man bezeichnet dieses Phänomen als - Kunststoff-Kondensatoren gehören zur Familie der - Kondensatoren. Die Elektroden können entweder aus einer dünnen bestehen; in diesem Fall trägt der Kondensator die Kurzbezeichnung Oder die Elektroden können aus einer auf der Kunststoff-Folie bestehen; in diesem Fall trägt der Kondensator die Kurzbezeichnung Dieser zweite Typ weist eine deutlich Kapazität pro Volumeneinheit auf. Bei der Herstellung entstandenen leitende Verbindungen zwischen den Elektroden werden bei hohen Spannungen, so daß um den Ort des Durchschlages ein entsteht; man nennt diesen Vorgang - Die wesentlichen Vorteile aller Kondensatoren dieser Familie sind, daß Kunststoff gegenüber Papier wesentlich eine geringere aufweist und weniger aufnimmt. Im Falle von Blasen zwischen den Schichten besteht bei hohen Feldstärken die Gefahr der

2.5 Übungen

2.5.1 Rechenaufgaben zu Kapitel 2

Aufgabe 1:

Ein Papierkondensator von 50 kVA habe einen Verlustfaktor von $\tan \delta = 3 \cdot 10^{-3}$ und einen ebenso großer Kondensator aus Polypropylen einen solchen von $0,2 \cdot 10^{-3}$ bei derselben Frequenz. Welche Verlustleistung besitzen sie, und welche Verlustenergie kann bei der Verwendung eines Polypropylen-Kondensators pro Jahr eingespart werden?

Ergebnis: $P_{\text{Papier}} = 150 \text{ W}$ $P_{\text{MKP}} = 10 \text{ W}$
Einsparung : $P = 1200 \text{ kWh}$

Aufgabe 2:

Schaltfestigkeit und Kapazitätstoleranz von Alu-Elkos: Man erkläre das Zustandekommen der Kapazitätsabnahme durch kurzschlußartige Entladung (z.B. Elektronenblitz, Netzteil-Elko im Fernsehempfänger).

Ergebnis: siehe Lösungsblatt

Aufgabe 3:

Serien- und Parallelersatzschaltbild bei Kapazitätsmessung:

- Unter welchen Bedingungen unterscheidet sich C_s von C_p ?
- Wann muß man sich der Mühe unterziehen, diesbezügliche Betrachtungen anzustellen?

Ergebnis: siehe Lösungsblatt

Aufgabe 4:

Ein Kunststoff-Wickelkondensator vom Typ MKT ($\epsilon_{R1} = 3,4$) weist 1000 Wicklungen mit einer durchschnittlichen Dicke $d_1 = 20 \mu\text{m}$ pro Wicklung auf. Die Abmessung des Kondensators beträgt $4 \cdot 5 \text{ mm}^2$ und sei für jede Wicklung konstant.

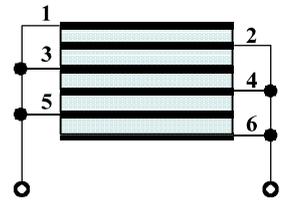
- Welche Kapazität C besitzt der Kondensator?
- Welche Güte Q weist der Kondensator bei einer Frequenz von 1 kHz auf, wenn das Dielektrikum einen Isolationswiderstand von $10^2 \text{ M}\Omega$ besitzt?
- Zur Verbesserung des Isolationswiderstandes wird nun eine 2. Lage des gleichen Dielektrikums ($\epsilon_{R2} = 3,4$) verwendet. Welche Dicke d_2 muß diese 2. Lage aufweisen, damit sich die Kapazität des Kondensators um nicht mehr als 10 % gegenüber dem einlagigen Typ verringert. (Anzahl der Wicklungen und Fläche bleiben konstant.)
- Wie hoch ist die elektrische Feldstärke in jeder der beiden Schichten, wenn am Kondensator eine Spannung von 10 V anliegt? Durch unsachgemäße Behandlung des Kondensators entsteht eine Luftblase zwischen beiden dielektrischen Schichten mit der Dicke $d_L \ll d_1, d_2$ und $\epsilon(\text{Luft}) = 1$.

Berechnen Sie die Feldstärke in dieser Luftblase.

Ergebnis: siehe Lösungsblatt

Aufgabe 5:

Ein Kondensator besteht entsprechend dem nebenstehenden Bild aus einem Stapel von metallischen Schichten, die durch ein Dielektrikum mit der relativen Dielektrizitätskonstanten $\epsilon_r = 7$ ($\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$) voneinander getrennt sind. Der Abstand der Schichten sei $d = 0,05 \text{ mm}$, die Fläche einer Schicht betrage $A = 1,5 \text{ cm}^2$.



- Wie verteilt sich die Ladung auf den einzelnen Schichten, wenn die Schichten wie in obigem Bild dargestellt verbunden sind.
- Berechnen Sie die Kapazität des Kondensators.
- Welche maximale Feldstärke tritt im Kondensator auf, wenn er an einer Spannung von $U = 15 \text{ V}$ liegt?
- Welche Ladung hat er dann gespeichert?

Ergebnis:

- zu a) Beläge 1 und 6 tragen $1/5$ der Gesamtladung Q
 Beläge 2 und 5 sowie 3 und 4 tragen je $2/5$ der Gesamtladung Q , weil sie in jeweils 2 Kondensatoren wirksam sind.
- zu b) $C = 930,3 \text{ pF}$
- zu c) $E = 0,3 \text{ kV/m}$
- zu d) $Q = 1,38 \cdot 10^{-8} \text{ As}$

2.5.2 Lösungen zu den Rechenaufgaben von Kapitel 2

Aufgabe 1:

Papier: $P = P_0 \tan \vartheta = 50 \text{ kVA} \cdot 3 \cdot 10^{-3} = \underline{150 \text{ W}}$

MKP: $P = P_0 \tan \vartheta = 50 \text{ kVA} \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} = \underline{10 \text{ W}}$

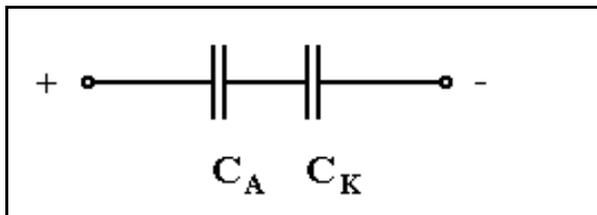
$\Rightarrow \Delta P = 140 \text{ W}$

$W_{\text{Verlust}} = 24 \text{ h/d} \cdot 365 \text{ d} \cdot 0,14 \text{ kW} = \underline{1226,4 \text{ kWh}}$

Aufgabe 2:

Kathode = Elektrolyt angeschlossen ("ankontaktiert") mit einer 2. Alu-Folie → natürliche Oxidschicht (ca. 5 nm) → daher Alu-Stromzuführungsfolie / natürliche Oxidschicht

1.) Elektrolyt hat Kapazität C_K , die der gewollten Kapazität C_A (Anodenkapazität) in Reihe geschaltet wird.



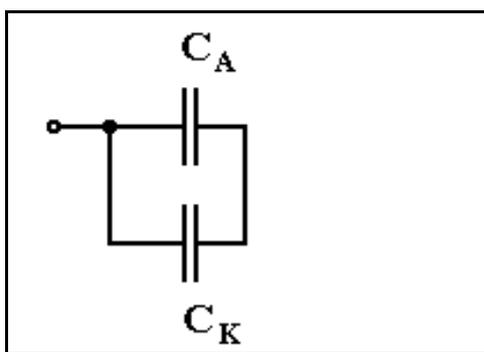
$$C_{\text{ges}} = \frac{C_A \cdot C_K}{C_A + C_K}$$

da: $C_K \gg C_A$ (da d_{DE} sehr dünn) gilt: $C_{\text{ges}} \approx C_A$

Zur Erfüllung dieser Bedingung wird Stromzuführungsfolie ebenfalls aufgeraut.

2.) Kondensator wird kurzgeschlossen:

d.h. C_A liegt parallel zu C_K → gespeicherte Energie wird auf beide Kapazitäten verteilt



$$\frac{U_K}{U_{\text{ges}}} = \frac{\frac{Q}{C_K}}{\frac{Q}{\frac{C_A \cdot C_K}{C_A + C_K}}} = \frac{C_A \cdot C_K}{C_K \cdot (C_A + C_K)} \approx_{C_K \gg C_A} \frac{C_A}{C_K}$$

$$U_K = Q/C_K$$

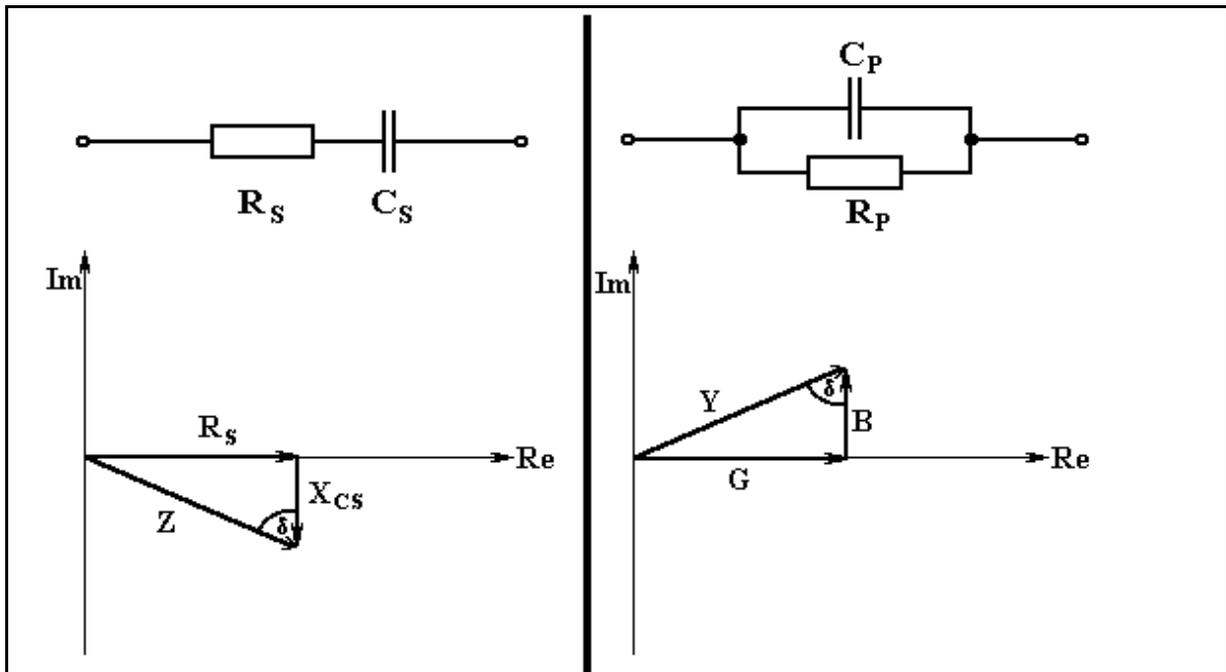
$$U_K \approx U_{\text{ges}} \cdot C_A/C_K$$

U_K sollte 2 V aber nicht überschreiten, da sonst Stromzuführungsfolie oxidiert wird und C_K kleiner wird und obige Bedingungen nicht mehr gelten, d. h. C_A sinkt im Extremfall auf:

$$C_A = C_K \quad C_{\text{ges}} = 1/2 C_A$$

⇒ Falschpolung sollte daher 2 V nicht überschreiten!

Aufgabe 3:



$$X_{CS} = \frac{1}{\omega \cdot C_S}$$

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

$$\tan \delta = R_S \cdot \omega \cdot C_S = \frac{R_S}{X_{CS}} \quad (2.17)$$

$$Z^2 = R^2 + X_{CS}^2 \quad (2.18)$$

$$Z^2 = R_P^2 \cdot \left(1 + \frac{1}{\tan^2 \delta} \right) \quad (2.19)$$

$$B = \omega \cdot C_P = \frac{1}{X_{CP}}$$

$$G = \frac{1}{R_P}$$

$$\tan \delta = \frac{G}{B}$$

$$\tan \delta = \frac{1}{R_P \cdot \omega \cdot C_P} = \frac{X_{CP}}{R_P} \quad (2.20)$$

$$\frac{1}{Z^2} = \frac{1}{R_P^2} + \frac{1}{X_{CP}^2}$$

$$Z^2 = \frac{R_P^2 \cdot X_{CP}^2}{R_P^2 + X_{CP}^2} \quad (2.21)$$

$$Z^2 = R_P^2 \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{\tan^2 \delta}} \quad (2.22)$$

Setze (2.19) = (2.22):

$$R_s^2 \cdot \left(1 + \frac{1}{\tan^2 \delta} \right) = R_p^2 \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{\tan^2 \delta} \right)} \Rightarrow R_s^2 = R_p^2 \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{\tan^2 \delta} \right)^2}$$

$$R_s = R_p \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{\tan^2 \delta}}$$

$$R_p = R_s \cdot \left(1 + \frac{1}{\tan^2 \delta} \right)$$

Unterschied zwischen R_s , R_p wird umso größer, je kleiner $\tan^2 \delta$ ist.

(2.23)

aus (2.20) + (2.21)

Parallelschaltung:

$$Z^2 = \frac{1}{\omega^2 \cdot C_p^2 \cdot (1 + \tan^2 \delta)} \quad (2.24)$$

$$Z^2 = \frac{R_p^2 \cdot X_{cp}^2}{R_p^2 + X_{cp}^2} = \frac{\frac{R_p^2}{\omega^2 \cdot C_p^2}}{R_p^2 + \frac{1}{\omega^2 \cdot C_p^2}} = \frac{R_p^2}{R_p^2 \cdot \omega^2 \cdot C_p^2 + 1}$$

$$Z^2 = \frac{1}{\omega^2 \cdot C_p^2 \cdot (1 + \tan^2 \delta)}$$

aus (2.17) + (2.18)

$$\text{Serienschaltung: } Z^2 = (\omega^2 \cdot C_s^2)^{-1} \cdot (1 + \tan^2 \delta) \quad (2.25)$$

Setze (2.24) = (2.25)

$$\frac{1}{\omega^2 \cdot C_s^2} \cdot (1 + \tan^2 \delta) = \frac{1}{\omega^2 \cdot C_p^2 \cdot (1 + \tan^2 \delta)}$$

$$C_s = C_p \cdot (1 + \tan^2 \delta)$$

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \tan^2 \delta}$$

(2.26)

a.) Prozentualer Unterschied zwischen C_s und C_p :

$$\begin{aligned}\Delta(\%) &= 100 \cdot (C_s - C_p)/C_p = 100 \cdot (1 + \tan^2 \delta - 1) \\ \Delta(\%) &= 100 \cdot \tan^2 \delta\end{aligned}\quad (2.27)$$

Unterschied umso größer, je größer der Verlustfaktor

$$\Delta < 1\% \quad \Rightarrow \quad \tan \delta < 0,1$$

b.) 1.) bei Präzisionsmessungen z. B. bei Elkos

wenn Kontakte zw. Anschluß nach Belägen schlecht sind

wenn DE unbekannt ist

2.) Problem dann, wenn mit unterschiedlichen Meßmethoden (Meßbrücken) gearbeitet wird

⇒ im Überlappungsgebiet unterschiedliche Meßergebnisse

Aufgabe 4:

a.) $C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A/d \cdot W$

$$C = 8,84 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm} \cdot (3,4 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2)/(2 \cdot 10^{-5} \text{ m}) \cdot 1000 \text{ Wickl.}$$

$$C = 3,0 \cdot 10^{-8} \text{ As/V}$$

$$\underline{C = 30 \text{ nF}}$$

b.) $Q = R \cdot \omega \cdot C$

$$Q = 10^8 \text{ V/A} \cdot 10^3 \text{ s}^{-1} \cdot 3 \cdot 10^{-8} \text{ As/V} \quad \underline{Q = 18850}$$

c.) $d_2 = (3,4 \cdot 8,84 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 10^{-5} \cdot 1000)/(2,7 \cdot 10^{-8}) - 2 \cdot 10^{-5}$

$$\underline{d_2 = 2,26 \mu\text{m}}$$

d.) $E_1 = U_{\text{ges}}/(U_1 + U_2)$

$$E_1 = (10 \text{ V})/(2 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 10^{-6} \text{ m}) = 4,54 \cdot 10^5 \text{ V/m}$$

$$E_1 = E_2$$

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A \cdot W \cdot \left(\frac{1}{d_1 + d_2} \right)$$

$$\frac{C}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A \cdot W} = \frac{1}{d_1 + d_2}$$

$$d_2 = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A \cdot W}{C} - d_1$$

$$E_i = \frac{U_{\text{ges}}}{\epsilon_{ri} \sum^n \frac{d_k}{\epsilon_{rk}}}$$

$$E_L = \frac{U_{\text{ges}}}{d_L + (d_1 + d_2) \cdot \frac{\epsilon_L}{\epsilon_r}} \approx \frac{\epsilon_r}{\epsilon_L} \cdot \frac{U_{\text{ges}}}{d_1 + d_2}$$

$$E_L \approx 3,4 \cdot \left(\frac{10 \text{ V}}{2,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}} \right)$$

$$E_L = 1,54 \cdot 10^6 \text{ V/m}$$

2.6 Quellenverzeichnis

- /1/ Hans R. Lacour
Elektron. Bauelemente Bd.1, Verlag Berliner Union, Stuttgart 3, 5, 21, 23, 25, 26, 31, 35
- /2/ Morgenstern, Bodo
Elektronik, Bd. I: Bauelemente, 6. Aufl., Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig/ Wiesbaden
1989 6, 35
- /3/ Sunda, Jack, Sonderdruck aus "Messen und Prüfen", Heft 3, 1981
Hans Holzmann Verlag GmbH & Co KG, Bad Wörishofen 12
- /4/ Rutronik Elektronische Bauelemente GmbH
Katalog Elektronische Bauelemente, RSC Halbleiter 14, 21, 27, 29, 32
- /5/ Günter Hunger
Einsatzkriterien und Konstruktionsmerkmale moderner Kunststoffolien-Kondensatoren, Sonder-
druck aus "elektronik journal", Heft 8/1981, Seite 3 15, 16
- /6/ Wolfgang Westermann
Wickel- oder Schichttechnik, Sonderdruck aus "Elektronik", Heft Nr.5 und Nr.6 1988 . . . 17
- /7/ Günter Hunger,
Aktive und passive Entflammbarkeit von Netz-Parallel-Kondensatoren, Elektronik Industrie, Heft
5, 1986 18
- /8/ WIMA, Wilhelm Westermann, Spezialvertrieb Elektronische Bauelemente, Mannheim,
Katalog: Capacitors for electronic equipment, 1995, S. 43 19, 21
- /9/ Wolfgang Westermann
Folienkondensator, quo vadis?,
Sonderdruck aus "Elektronik-Entwicklung", Heft 4, 1989, S.627 21
- /10/ Farnell Components,
Bauteile für die Elektronik, Bd.12, Jan.1997, S. 366 21, 27
- /11/ Ekbert Hering, Klaus Bressler, Jürgen Gutekunst
Elektronik für Ingenieure, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1992 33
- /12/ Schindheim, Karl-Heinz, Impulsfeste Kondensatoren, Elektronik Heft 8, 1997, Seite 94- 98
. 35
- /13/ Kefer, Wolfgang, Sicher ist Sicher, Elektronik Praxis Nr. 20, 21. Oktober 1997, Seite 36
. 35
- /14/ N.N., Speicherzwerge, Elektronik Praxis, Heft 20, 21. Oktober 1997, Seite 31 35, 36