

INGENIEUR- FERNSTUDIUM

Winkler

Bauelemente der Informations- elektrik I 3

Herausgeber:
Ingenieurhochschule
Mittweida

200.40-03

L E H R W E R K
für das Ingenieur-Fernstudium

Dipl.-Ing. Wolfgang Winkler

B A U E L E M E N T E
D E R
I N F O R M A T I O N S -
E L E K T R I K I

3

Widerstände (Fortsetzung)

Veröffentlicht:
INSTITUT FÜR FACHSCHULWESEN DER
DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK
KARL-MARX-STADT

Lektoren:

- 1. Fachlektor:** Dipl.-Ing. Kurt Biebach
VEB Werk für Bauelemente
der Nachrichtentechnik
"Carl v. Ossietzky" Teltow
- 2. Fachlektor:** Dipl.-Ing. Wolfgang Kielhorn
VEB Fernmeldewerk Leipzig
- Deutschlektor:** Fachschuldozent Arthur Gärtner
Ingenieurschule für Elektrotechnik
Mittweida
- Bearbeitung:** Ingenieurschule für Elektrotechnik
Mittweida
Lehrbriefentwicklung

Redaktionsschluß: 15.6.1969

Best.-Nr. 200.40 - 03

Inhaltsverzeichnis

Seite

3.1.2.	Temperaturabhängige Widerstände mit positivem Temperaturkoeffizient	1
3.1.2.1.	Metallische Kaltleiter	1
3.1.2.2.	Keramische Kaltleiter	3
3.1.2.2.1.	Widerstands-Temperatur-Kennlinie	3
3.1.2.2.2.	Strom-Spannungs-Kennlinie	7
3.1.2.2.3.	Belastbarkeit	10
3.1.2.2.4.	Wechselspannungsverhalten	11
3.1.2.2.5.	Anwendung	11
3.1.2.2.5.1.	Temperaturfühler	11
3.1.2.2.5.2.	Überlastungsschutz	13
3.1.2.2.5.3.	Stromstabilisierung	13
3.1.2.2.5.4.	Relaisverzögerung	13
3.1.2.2.5.5.	Kippschwingungsgenerator	14
3.1.2.2.6.	Prognostische Einschätzung	15
3.1.2.3.	Eisen - Wasserstoff - Widerstände	15
3.1.2.3.1.	U-I-Kennlinie	15
3.1.2.3.2.	Anwendung	17
3.1.2.3.3.	Vor- und Nachteile	17
3.2.	Spannungsabhängige Widerstände	17
3.2.1.	U-I-Kennlinie	19
3.2.2.	Statischer Widerstand	21
3.2.3.	Dynamischer Widerstand	22
3.2.4.	Temperaturabhängigkeit der elektrischen Eigenschaften	23
3.2.5.	Belastbarkeit	25
3.2.6.	Wechselspannungsverhalten	26
3.2.7.	Schaltungstechnik	29
3.2.8.	Alterung	32
3.2.9.	Messung von C und β	33
3.2.10.	Anwendung von Varistoren	35
3.2.10.1.	Spannungsstabilisierung	35
3.2.10.2.	Spannungsbegrenzung	43
3.2.10.3.	Linearisierung von Kippspannungen	45

	Seite	
3.2.10.4.	Meßbereichsdehnung	47
3.2.10.5.	Erhöhung der Schaltempfindlichkeit von Relais	47
3.2.10.6.	Überspannungsableitung	48
3.2.11.	Fertigungsprogramm spannungsabhängiger Widerstände	49
	Kontrollfragen	52
	Übungsaufgaben	53

3.1.2. Temperaturabhängige Widerstände mit positivem Temperaturkoeffizienten

Widerstände mit positivem Temperaturkoeffizienten vergrößern bei Erwärmung ihren Widerstandswert. Sie sind also im kalten Zustand niederohmiger und werden deshalb als **K a l t l e i - t e r** bezeichnet. In der angelsächsischen Literatur ist häufig die Abkürzung PTC ($\hat{=}$ Positive Temperature Coefficient) zu finden.

3.1.2.1. Metallische Kaltleiter

Die ersten technischen Realisierungen des Kaltleiterprinzips basierten auf der Temperaturabhängigkeit des Widerstandes von Metallen. Diese metallischen Kaltleiter besitzen eine Wendel aus sehr dünnem Draht (in der Regel Wolfram o.ä.), der bei Stromfluß so weit aufgeheizt wird, daß sich der Widerstandswert merklich ändert. Die Wendel ist zum Schutz vor Oxydation und den Einflüssen der Umgebung in ein Glasröhrchen eingeschmolzen. Häufig werden auch Glühbirnen zu dieser Rubrik der temperaturabhängigen Widerstände gerechnet.

Nachteile der metallischen Kaltleiter sind:

Der Widerstandswert im kalten Zustand kann nicht beliebig hoch gewählt werden; die nutzbare Widerstandsänderung beträgt im äußersten Falle 1:10, meistens jedoch nur 1:3 bis 1:5; bei kleinen Strömen ist die Steilheit der $R = f(I)$ - Kennlinie niedrig; die mechanische Festigkeit, besonders die Rüttelfestigkeit, ist nur gering; die Lebensdauer ist vergleichsweise kurz.

Einige typische Kennlinien für metallische Kaltleiter zeigen die Bilder 3.23, 3.24 und 3.25. Wegen ihrer Nachteile werden die metallischen Kaltleiter mehr und mehr von den keramischen Kaltleitern abgelöst und wahrscheinlich eines Tages völlig von diesen verdrängt werden.

Näheres zu diesem Thema ist der Literatur /1/, /2/ und /3/ zu entnehmen.

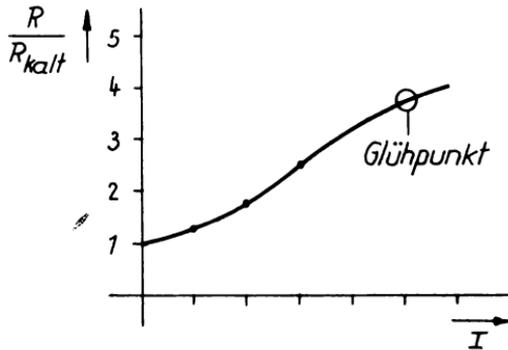


Bild 3.23 Widerstand eines metallischen Kaltleiters, bezogen auf seinen Kaltwert, in Abhängigkeit vom Strom

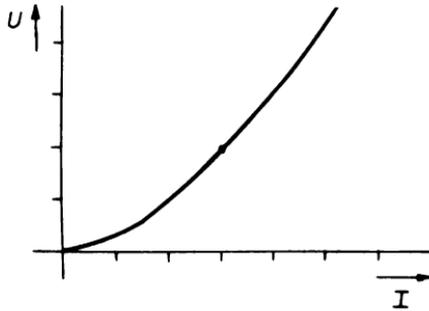


Bild 3.24 Strom-Spannungs-Kennlinie eines metallischen Kaltleiters

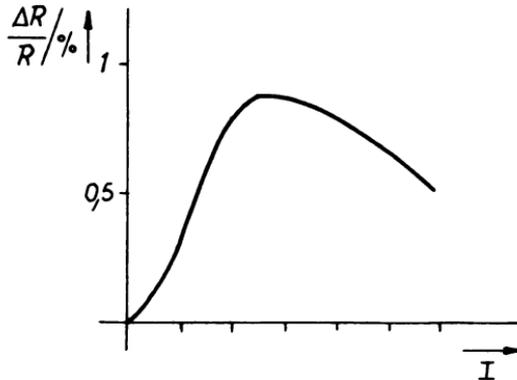


Bild 3.25 Steilheit des Widerstandsanstieges in Abhängigkeit vom Kaltleiterstrom

3.1.2.2. Keramische Kaltleiter

Die Entwicklung der keramischen Kaltleiter ist noch nicht so weit gediehen wie die der Heißeiter. Es sei deshalb hier nur auf einige prinzipielle Zusammenhänge hingewiesen.

3.1.2.2.1. Widerstands-Temperatur-Kennlinie

Die keramischen Kaltleiter sind Bauelemente auf der Basis von Bariumtitanat ($BaTiO_3$). Durch geeignete Dotierung gelingt es, dem an sich nichtleitenden Bariumtitanat Halbleitereigenschaften zu geben. Allerdings tritt bezüglich des Temperaturverhaltens eine bemerkenswerte Abweichung von den üblichen Halbleitereigenschaften auf:

Der Temperaturkoeffizient des Widerstandes kann unter Umständen stark positiv sein. Es gilt für die Temperatur-Widerstands-Charakteristik etwa der in Bild 3.26 skizzierte Verlauf. Unterhalb einer bestimmten Temperatur ist der Temperaturkoeffizient schwach negativ, um dann bei Überschreiten dieser Temperatur positiv zu werden. In dem nun folgenden Teil der Kennlinie ist ein ungewöhnlich steiler Anstieg des Widerstandes mit der Temperatur zu verzeichnen. Der Temperaturkoeffizient kann bei manchen Typen in diesem Gebiet Werte bis zu ca. $+60\%/^{\circ}C$ erreichen. Das ist dem Betrage nach wesentlich mehr als bei den bisher angebotenen Heißeitern. Allerdings ist diese Empfindlichkeit auf einen relativ engen Temperaturbereich begrenzt. Der Temperaturkoeffizient ist innerhalb dieses Bereiches nicht konstant. Die Breite dieses Gebietes mit PTC-Verhalten beträgt etwa $100^{\circ}C$. Wenn die Temperatur einen bestimmten oberen Grenzwert überschreitet, wird der Temperaturkoeffizient wieder negativ, wie es bei Halbleitern sonst üblich ist.

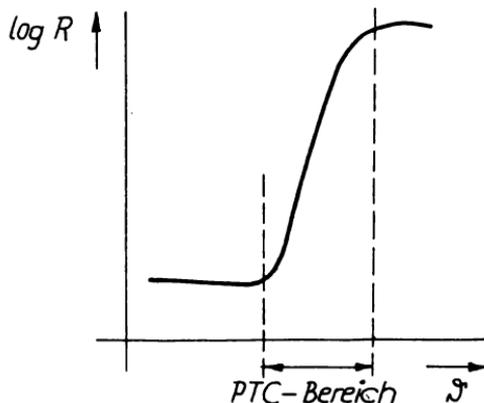


Bild 3.26 Widerstands-Temperatur-Kennlinie eines keramischen Kaltleiters

Der ganze dem Kaltleitereffekt zugrunde liegende Mechanismus läßt sich durch die Annahme von Sperrschichten zwischen den einzelnen Kristalliten des zusammengesinterten polykristallinen $BaTiO_3$ erklären. /4/, /5/, /6/.

Zuerst wurde dieser Effekt an $BaTiO_3$ nachgewiesen, das seinen größten Temperaturkoeffizienten bei ca. 120°C hat (Curie-Punkt). Inzwischen hat man erkannt, daß durch geeignete Zusätze die Curie-Temperatur - und damit der gesamte PTC-Bereich - verschoben werden kann. (Siehe Bild 3.27).

So kann man - teilweise erst im Laboratoriumsmaßstab - Kaltleiter herstellen, deren Curie-Temperaturen zwischen -50 und $+400^\circ\text{C}$ liegen.

Eine weitere bemerkenswerte, allerdings unerwünschte Eigenschaft der $BaTiO_3$ -Keramiken besteht darin, daß oberhalb der Curie-Temperatur der Widerstand spannungsabhängig ist. (Siehe Bild 3.28). /7/

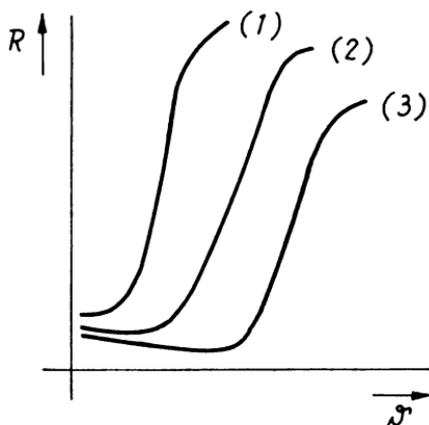


Bild 3.27

$R=f(S)$ -Kennlinien
unterschiedlich
dotierten Barium-
titanats

(1) Strontiumzusatz

(2) BaTiO_3

(3) Bleizusatz

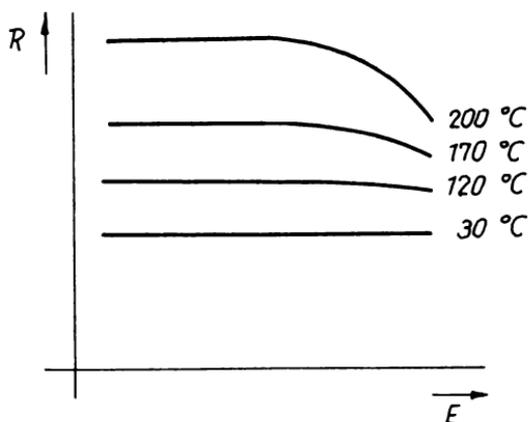


Bild 3.28

Widerstand eines
keramischen Kalt-
leiters in Abhän-
gigkeit von der
Feldstärke bei
verschiedenen
Temperaturen

(Curie-Temp. = 120 °C)

Eine Eigenschaft, die sich sehr störend auswirken kann, ist die starke Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätskonstanten (Bild 3.29). Dazu kommt noch, daß Bariumtitanat zu den Ferroelektrika gehört; d.h., die elektrische Polarisierung zeigt bei Zimmertemperatur eine Hysterese und in starken Feldern Sättigung.

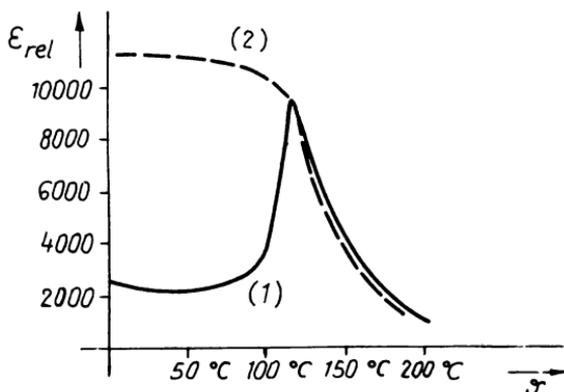


Bild 3.29 Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätskonstanten ϵ_{rel} von Bariumtitanat;

(1) gemessen bei Feldstärke $10 \frac{V}{cm}$

(2) gemessen bei Feldstärke $3 \frac{kV}{cm}$

Die keramischen Kaltleiter werden nach folgenden Kennwerten beurteilt:

R_{20}	"Kaltwiderstand";	- Widerstandswert bei $20^\circ C$.
T_s	"Sprungtemperatur";	- Temperaturwert, bei dem der Widerstand auf den 1,5- bis 5-fachen Wert von R_{20} angestiegen ist.
T_M	"Maximaltemperatur";	- höchste zulässige Temperaturbelastung.
f_A	"Anstiegsfaktor";	- Faktor der Widerstandsänderung zwischen $T=20^\circ C$ und $T=T_M$.
U_{max}	maximal zulässige Betriebsspannung.	
C	"Dissipationskonstante" $[C] = \frac{W}{grad}$	- mittlerer Leistungsbedarf für eine Temperaturerhöhung von $1^\circ C$ gegenüber der Umgebungstemperatur.

Die z.Zt. in der Praxis zugänglichen Werte liegen etwa in folgenden Größenordnungen:

$$R_{20} \approx 30 \text{ bis } 60 \Omega;$$

$$f_A \approx 10^3 \text{ bis } 10^4;$$

$$T_s \approx 50^\circ C \text{ bis } 120^\circ C;$$

$$j_M \approx 130 \text{ }^\circ\text{C bis } 190 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$C \geq 4 \text{ bis } \geq 10 \frac{\text{mW}}{\text{grad}}.$$

In der DDR werden keramische Kaltleiter vom VEB Keramische Werke Hermsdorf hergestellt. Die Typenbezeichnung dieser scheibenförmigen Bauelemente wurde vom VEB KWH wie folgt festgelegt: /13/

Kennbuchstaben: TP (Temperaturabhängiger Widerstand mit positivem Temperaturkoeffizienten); anschließend eine Zahl, die den Kaltwiderstand in Ohm angibt; von dieser Zahl durch einen Schrägstrich getrennt eine zweite Zahl, die die Sprungtemperatur in $^\circ\text{C}$ ausdrückt; nach einem Längsstrich folgt die Angabe des Scheibendurchmessers in mm.

Beispiel: TP 40/120 - 7

Kaltleiter mit 40Ω Kaltwiderstand; Sprungtemperatur $120 \text{ }^\circ\text{C}$; Durchmesser 7 mm.

Die Sprungtemperatur wird in allen Typenreihen jeweils durch eine Kennfarbe angegeben.)

3.1.2.2.2. Strom-Spannungs-Kennlinie

In Bild 3.30 ist schematisch die statische Strom-Spannungs-Kennlinie dargestellt. Es wird vorausgesetzt, daß Temperaturänderungen nur infolge der Eigenerwärmung zustande kommen. Umgebungstemperatur und Kühlbedingungen sollen konstant sein. Die Kennlinie hat vier Bereiche:

Zunächst verhält sich der Kaltleiter wie ein linearer Widerstand, weil die umgesetzte elektrische Leistung keine merkliche Temperaturerhöhung bewirkt. Mit zunehmender Spannung steigt die Leistung und folglich die Temperatur, bis das Gebiet des stark positiven Temperaturkoeffizienten erreicht wird. Der Widerstand wird rasch größer, der Strom nimmt wieder ab. Nach Erreichen des Curie-Punktes wird der Widerstandsverlauf auch noch von der Spannung beeinflusst (Vgl. Bild 3.28). Als Folge dieser beiden gegenläufigen Effekte entsteht ein gewisser Kennlinienbereich, in dem sich der Strom nur noch sehr

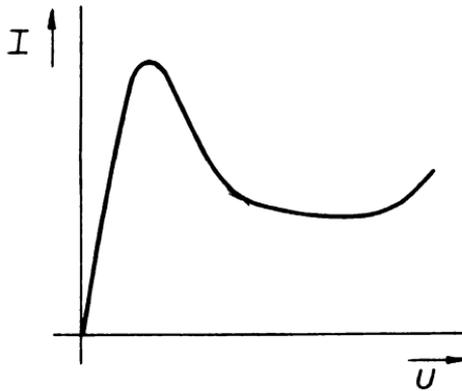


Bild 3.30 Strom-Spannungs-Kennlinie eines keramischen Kaltleiters (schematisch)

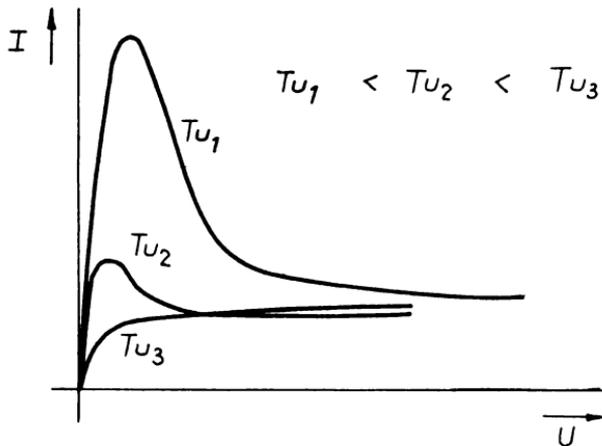


Bild 3.31 Strom-Spannungs-Kennlinien eines keramischen Kaltleiters bei verschiedenen Werten der Umgebungstemperatur

wenig mit der Spannung ändert. Wenn die Temperatur so weit ansteigt, daß der PTC-Bereich verlassen wird, steigt der Strom wieder an, aber wegen der Spannungsabhängigkeit des Widerstandes stärker als linear.

Da das Zustandekommen der Kennlinie in erster Linie an Temperaturänderungen gebunden ist und jede Temperaturänderung träge verläuft, gilt diese Kennlinie nur für Gleichspannung bzw. für sehr langsam verlaufende Änderungen: statische Kennlinie. Der Verlauf der U - I -Kennlinie ist weitestgehend von der Curie-Temperatur, der Wärmeableitung, der Umgebungstemperatur und den geometrischen Abmessungen abhängig.

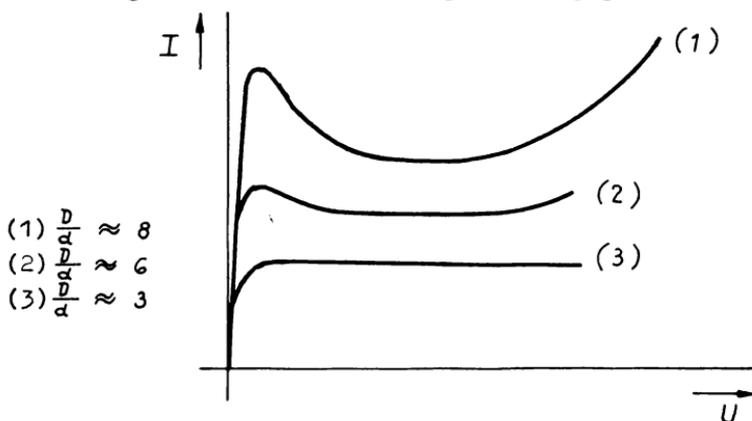


Bild 3.32 Strom-Spannungs-Kennlinien von Kaltleitern aus dem gleichen Material, aber mit unterschiedlichen Werten des Verhältnisses Durchmesser
Dicke

Bild 3.31 zeigt die Abhängigkeit der U - I -Kennlinie von der Umgebungstemperatur, Bild 3.32 die Abhängigkeit von den geometrischen Abmessungen.

Für die Kennlinie des Kaltleiters ergibt sich im Dualismus zum Heißleiter ein deutlich ausgeprägtes Strommaximum. Nach /8/ kann man den Betrag des Maximalstromes aus der $R=f(J)$ -Kennlinie ermitteln, wenn die Dissipationskonstante C bekannt ist.

Es gilt:

$$I_{\text{grenz}} = \sqrt{\frac{C \cdot (\vartheta_{\text{grenz}} - \vartheta_{\text{umg}})}{R_{\text{grenz}}}}$$

mit I_{grenz} = Maximalstrom; ϑ_{grenz} = Temp. des Widerstandes bei I_{grenz} ;
 ϑ_{umg} = Umgebungstemperatur; R_{grenz} = Widerstandswert bei I_{grenz} .
 R_{grenz} und ϑ_{grenz} sind gemäß Bild 3.33 zu ermitteln.

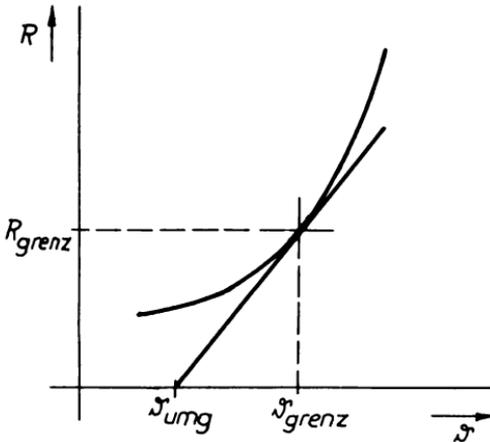


Bild 3.33 Ermittlung von R_{grenz} und ϑ_{grenz}

3.1.2.2.3. Belastbarkeit

Wegen der geringen thermischen Leitfähigkeit (ca. $30 \text{ mW/cm } ^\circ\text{C}$) und wegen der niedrigen Spannungsfestigkeit des Materials ergeben sich vorläufig Grenzen einer zweckmäßigen Dimensionierung und der maximalen Belastbarkeit.

Für BaTiO_3 gilt dabei näherungsweise:

- maximaler Strom bis zu einigen 100 mA ,
- maximale Spannung bis zu etwa 70 V ,
- maximale Leistung etwa 1 bis 5 W .

Zu erwähnen ist, daß die Kaltleiter (im Gegensatz zu den Heißleitern) beliebig parallelgeschaltet werden können. Ein Durchschlag ist, solange das Bauelement im PTC-Bereich arbeitet, nicht zu befürchten. Dort, wo sich durch Stromwärme ein heißer-

rer Kanal bildet, wird das Material sofort hochohmiger und die Stromdichte verringert.

3.1.2.2.4. Wechsellspanungsverhalten

Wegen ihrer hohen Dielektrizitätskonstante sind $BaTiO_3$ -Kaltleiter bei hohen Frequenzen nicht verwendbar, abgesehen davon, daß die $U-I$ -Kennlinie sowieso nur statisch gilt.

Sehr problematisch ist weiterhin eine einwandfreie Kontaktierung der $BaTiO_3$ -Körper. Es kann dabei leicht zur Bildung von Sperrschichten auf der Oberfläche des Halbleiters kommen. Der Kaltleiter kann unter ungünstigen Bedingungen dabei Gleichrichtereigenschaften erhalten. Eine für Laborversuche ausreichende Kontaktierung gelingt mit Indium und Indium-Blei-Legierungen.

3.1.2.2.5. Anwendung

Die in den vorangegangenen Abschnitten erläuterten Eigenschaften eröffnen dem Kaltleiter viele Anwendungsmöglichkeiten, besonders in der Meß- und Regelungstechnik.

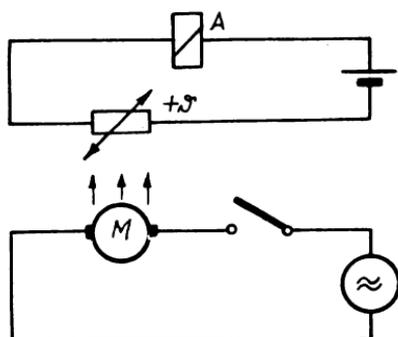
3.1.2.2.5.1. Temperaturfühler

Auf Grund seines großen Temperaturkoeffizienten eignet sich der Kaltleiter vorzüglich als Temperaturfühler. Auch mit relativ unempfindlichen Meßgeräten kann man dank seiner hohen Empfindlichkeit brauchbare Ergebnisse erhalten. Es ist jedoch notwendig, daß entweder die Curie-Temperatur von vornherein in der Größenordnung der zu messenden Temperatur liegt oder daß der Kaltleiter durch einen ihm aufgeprägten Strom so weit erwärmt wird, daß der Arbeitspunkt im Bereich des größten Temperaturkoeffizienten liegt. Für genaue Messungen werden Brückenschaltungen benutzt, wie sie schon bei den Heißleitern erläutert wurden; für weniger genaue Messungen genügt eine einfache Widerstands- oder Strommessung. Die Ansprechzeit, d.h. die thermische Trägheit hängt von den geometrischen Abmessungen ab. Der kleinste bisher erreichte Wert liegt bei etwa 0,5 s./7/.

Die Anwendung als Temperaturfühler beschränkt sich keineswegs nur auf direkte Temperaturmessungen. Es gibt eine Reihe von Beispielen, bei denen die Messung einer physikalischen Größe durch eine Kontrolle der Temperatur oder der Wärmeableitung erfolgt.

Erwähnt seien hier nur die Infrarotmessung, Röntgen- und Gammastrahlenmessung, Flüssigkeitsstandanzeige, Durchflußmengenmesser, Feuchtigkeitsmessung bei Gasen und das Vakuummeter nach Pirani.

Besonders hervorgehoben werden muß in diesem Zusammenhang der Temperatur- und Überlastungsschutz von Elektromotoren. Der Kaltleiter wird dabei zweckmäßigerweise in die Wicklung eingewickelt und kann so die Erwärmung an ihrem eigentlichen Entstehungsort kontrollieren. Bild 3.34 zeigt eine Prinzipschaltung für eine einfache, aber wirkungsvolle Anwendung des Kaltleiters in dieser Funktion. Aus einer Spannungsquelle wird über den Kaltleiter ein Relais gespeist. Solange die Temperatur des Kaltleiters niedrig ist, ist sein Widerstand klein, und es kann ein hinreichend großer Strom fließen, der das Relais im angezogenen Zustand hält. Bei einer Überlastung, d.h. bei einer Erhöhung der Temperatur in der Motorwicklung, wird der Heißleiter hochohmiger, der Strom geringer, und das Relais fällt ab.



(Motorwicklung und Widerstand haben innigen Wärmekontakt)

Bild 3.34 Motorschutz mit Kaltleiter

Eine andere Möglichkeit zeigt Bild 3.35. Hier leuchtet eine Glimmlampe auf, wenn der Kaltleiter hochohmig wird.

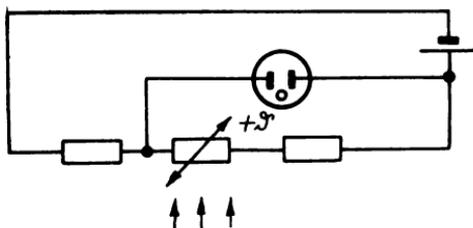


Bild 3.35 Temperaturüberwachung mit Kaltleiter

3.1.2.2.5.2. Überlastungsschutz

In Stromkreisen, in denen nur niedrige Leistungen umgesetzt werden, kann der Kaltleiter direkt als Überlastungsschutz verwendet werden. Die statische $U-I$ -Kennlinie zeigt, daß der Strom einen bestimmten Wert nicht übersteigen kann, solange die Spannung nicht so hoch wird, daß der Varistoreffekt überwiegt. Es ist dabei jedoch zu berücksichtigen, daß sehr schnelle, kurzzeitige Überlastungen wegen der thermischen Trägheit nicht erfaßt werden.

3.1.2.2.5.3. Stromstabilisierung

Aus den Bildern 3.31 und 3.32 ist zu entnehmen, daß unter bestimmten Bedingungen die $U-I$ -Kennlinie in einem gewissen Bereich nahezu parallel zur U -Achse verläuft. In diesem Bereich ist also der Kaltleiter als Stromkonstanthalter zu verwenden. Allerdings ist zu beachten, daß die stabilisierende Wirkung nur für sehr langsame Änderungen wirksam wird.

3.1.2.2.5.4. Relaisverzögerung

Bild 3.36 gibt eine Prinzipschaltung zur Anzugsverzögerung wieder. Nach Einschalten der Spannung fällt zunächst die gesamte Spannung am Widerstand ab. Allmählich wird der Kaltleiter aufgeheizt, die Spannung an ihm steigt, und das Relais spricht an.

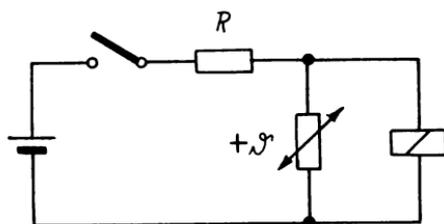


Bild 3.36 Relaisanzugsverzögerung
mittels Kaltleiter

Bild 3.37 zeigt eine Prinzipschaltung der Abfallverzögerung. Nach Öffnen des Schalters S ist der Kaltleiter zunächst noch niederohmig, erwärmt sich nun aber infolge der elektrischen Belastung, und der Strom durch das Relais wird verringert, das Relais fällt ab. Nachteilig ist in beiden Fällen, daß die Verzögerungszeit von der Umgebungstemperatur abhängig ist.

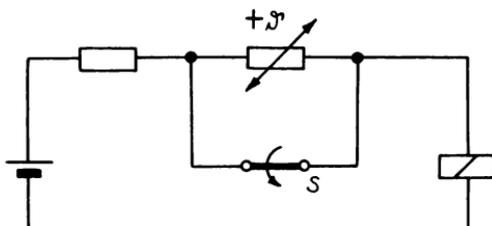


Bild 3.37 Relaisabfallverzögerung
mittels Kaltleiter

3.1.2.2.5.5. Kippschwingungsgenerator

Da die $U-I$ -Kennlinie einen fallenden Ast aufweist, d.h. ein Gebiet negativen differentiellen Widerstandes, sind Kaltleiter prinzipiell zur Erzeugung von Kippschwingungen geeignet. Wegen der thermischen Verknüpfung, die dieser Kennlinie zugrunde liegt, läßt sich der Kaltleiter jedoch nur zur Erzeugung sehr

niederfrequenter Schwingungen ($f < 1\text{ Hz}$) verwenden.

3.1.2.2.6. Prognostische Einschätzung

Kaltleiter auf BaTiO_3 -Basis sind erst seit verhältnismäßig kurzer Zeit bekannt. Gegenwärtig haftet ihnen noch eine Reihe von Unzulänglichkeiten an. Es ist aber anzunehmen, daß es gelingen wird, einige dieser störenden Einflüsse zurückzudrängen. Da die Entwicklung auf diesem Gebiet noch längst nicht abgeschlossen ist, empfiehlt es sich, laufend die Mitteilungen und Applikationsschriften der Hersteller zu verfolgen, um über den jeweils neuesten Stand informiert zu sein.

3.1.2.3. Eisen - Wasserstoff - Widerstände

Der Eisen-Wasserstoff-Widerstand (EW) ist einstromstabilisierendes Bauelement, das jedoch heute bereits etwas veraltet ist und in zunehmendem Maße von moderneren Bauelementen auf Halbleiterbasis verdrängt wird.

Der EW besteht aus einem Eisendraht, der in einer Wasserstoff-Atmosphäre bestimmten Druckes aufgespannt ist. Diese Wasserstofffüllung hat die Aufgabe, für gute Wärmeableitung zu sorgen, und stellt gleichzeitig einen Oxydationsschutz dar.

3.1.2.3.1. U-I-Kennlinie

Da Eisen in der Nähe seiner Curie-Temperatur, also bei etwa $770\text{ }^\circ\text{C}$, sein Kristallgefüge ändert, was mit einer starken Widerstandserhöhung verbunden ist, ist der EW in diesem Bereich ein Widerstand mit stark positivem Temperaturkoeffizienten. Die Spannungs-Widerstands-Kennlinie erscheint hier nach oben gekrümmt; die Strom-Spannungs-Kennlinie weist nur einen schwachen Stromanstieg auf. (Bilder 3.38 und 3.39).

Nennspannung und Nennstrom eines EW werden für die Mitte dieses Regelbereiches angegeben. Die Grenzen des Regelbereiches sind definiert als die Punkte, an denen $\frac{\Delta I}{I_N} \leq \pm 8\%$ ist. Der Regelbereich erstreckt sich mit dieser Festlegung im allgemeinen etwa von $0,5 U_0$ bis $1,5 U_0$ (Vgl. Bild 3.40).

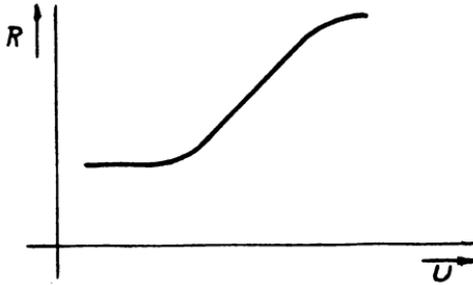


Bild 3.38 Spannungs-Widerstands-Kennlinie eines Eisen-Wasserstoff-Widerstandes (schematisch)

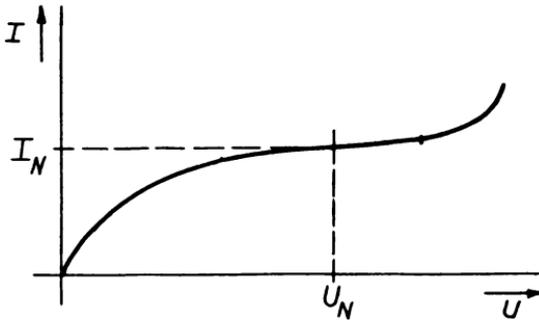


Bild 3.39 Strom-Spannungs-Kennlinie eines Eisen-Wasserstoff-Widerstandes

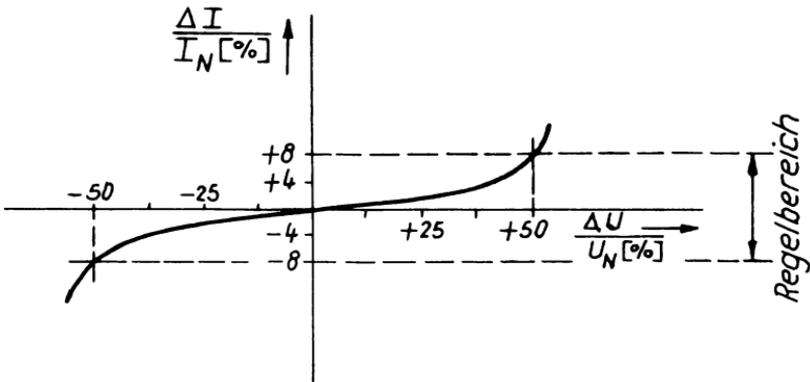


Bild 3.40 Strom-Spannungs-Kennlinie eines Eisen-Wasserstoff-Widerstandes in normierter Darstellung

Die Strom-Spannungs-Kennlinie kann innerhalb des Regelbereiches näherungsweise durch die Beziehung /9/

$$\frac{\Delta I}{I_N} \approx 0,266 \cdot \left(\frac{\Delta U}{U_N} \right)^{1,5}$$

beschrieben werden. Man erkennt, daß der EW über einen großen Spannungsbereich die Stromschwankungen auf relativ kleine Werte begrenzt.

3.1.2.3.2. Anwendung

Die Anwendung der EW erfolgt fast ausschließlich zur Stromstabilisierung. Am bekanntesten ist ihre Verwendung zum Konstanthalten des Heizstromes von Röhren. Eine Berechnungsanleitung für derart stabilisierte Kreise ist in der Literatur /9/ angegeben.

3.1.2.3.3. Vor- und Nachteile

Dem bereits erwähnten Vorteil des großen Regelbereiches steht eine Reihe von Nachteilen gegenüber:

EW sind durch Einschaltvorgänge gefährdet, da sie eine relativ geringe Wärmeträgheit besitzen. Wenn sie in einer Reihenschaltung mit anderen, trägeren Bauelementen mit positivem Temperaturkoeffizienten liegen, tritt am EW eine Spannungsspitze auf (z.B. Heizkreis von Röhren).

EW haben im Vergleich zu Kaltleitern auf Halbleiterbasis eine geringe Lebensdauer. Besonders zerstörend können häufige Einschaltvorgänge auf die Wendel wirken.

Die mechanische Festigkeit des Eisendrahtes ist gering. Der EW ist erschütterungsempfindlich und im allgemeinen an eine bestimmte Gebrauchslage gebunden.

Bei einer elektrischen Überlastung verliert der EW seine Regeleigenschaften teilweise oder völlig.

Hersteller der EW ist der VEB Glühlampenwerk Oberweißbach.

3.2. Spannungsabhängige Widerstände

Bei den spannungsabhängigen Widerständen ist zu unterscheiden zwischen denjenigen mit symmetrischer und solchen mit unsymme-

trischer Kennlinie (Vgl. Bild 3.41 !).

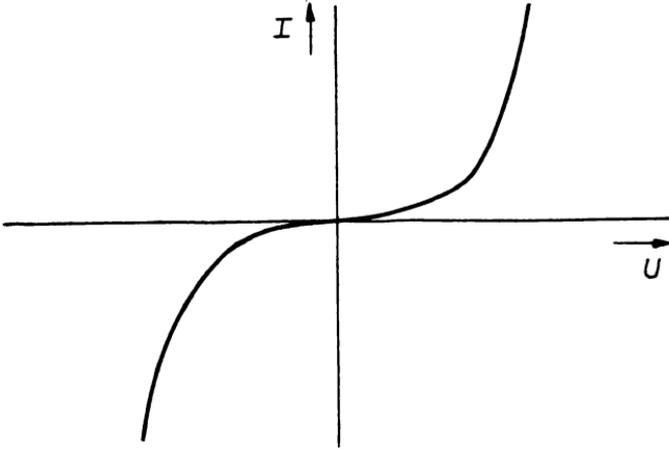


Bild 3.41 a Spannungsabhängiger Widerstand mit symmetrischer Kennlinie

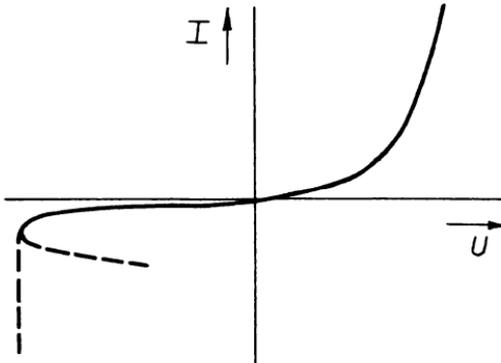


Bild 3.41 b Spannungsabhängiger Widerstand mit unsymmetrischer Kennlinie

In diesem Rahmen sollen nur die Widerstände mit symmetrischer Kennlinie behandelt werden. Die zweite Gruppe, zu denen die gesamten Gleichrichter gehören, soll hier nicht untersucht werden.

Die zu betrachtenden keramischen, spannungsabhängigen Widerstände werden als Varistoren bezeichnet, häufig auch als SV-Widerstände oder kurz als VDR ($\hat{=}$ Voltage Dependent Resistor). Varistoren bestehen aus Siliziumkarbidkörnern, die bei einer Temperatur von 1000 bis 1300 °C zusammengesintert werden. Je nach dem verwendeten Rohstoff und dem Herstellungsverfahren ergeben sich unterschiedliche Eigenschaften, wobei jedoch der Grundcharakter der gleiche ist.

Nach dem Sintern werden die Varistoren kontaktiert und mit einem Wachs imprägniert, um das Eindringen von Feuchtigkeit zu verhindern.

Die aus der Fertigung kommenden Varistoren werden künstlich gealtert, um ihre Eigenschaften zu stabilisieren.

Der überwiegende Teil der Varistoren hat Scheibenform.

3.2.1. U-I-Kennlinie

Eine exakte Erklärung der Vorgänge im Varistor, eine endgültige Deutung des Stromleitungsmechanismus ist noch nicht gelungen. Man vermutet, daß in erster Linie die Übergangszonen zwischen einander benachbarten Siliziumkörnern dafür maßgebend sind. Im allgemeinen gilt die in Bild 3.42 skizzierte U-I-Charakteristik. Für Stromdichten $> 0,1 \text{ mA/cm}^2$ kann man bei Varistoren näherungsweise setzen:

$$U = C \cdot I^\beta \quad (3.14)$$

Der Exponent β ist ein Maß für die Nichtlinearität der Kennlinie. Es ist $0 < \beta < 1$. Je kleiner β ist, desto stärker gekrümmt ist die Kurve; je größer β wird, desto mehr wird die Kurve linearisiert.

$\beta = 1$ entspricht einem linearen Widerstand.

β heißt der Nichtlinearitätskoeffizient. Er läßt sich, wenn die U-I-Kennlinie gegeben ist, anhand der Gleichung (3.14) wie folgt ermitteln:

Aus der Kennlinie werden zwei beliebige Punkte mit den Werten $U_1; I_1$ und $U_2; I_2$ entnommen.

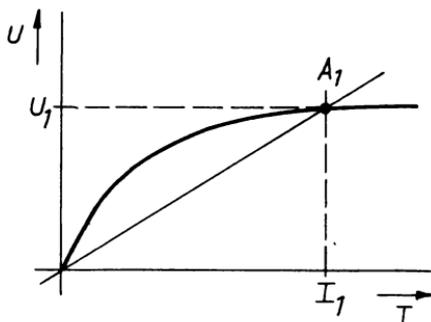


Bild 3.42 Strom-Spannungs-Kennlinie eines Varistors in linearem Maßstab (Da die Kennlinie symmetrisch ist, wird meist nur der erste Quadrant betrachtet)

Es gilt:

$$\begin{aligned}
 U_1 &= C \cdot I_1^\beta & U_2 &= C \cdot I_2^\beta \\
 \ln U_1 &= \ln C + \beta \cdot \ln I_1 & \ln U_2 &= \ln C + \beta \cdot \ln I_2 \\
 \beta &= \frac{\ln \left(\frac{U_1}{U_2} \right)}{\ln \left(\frac{I_1}{I_2} \right)} & & (3.15)
 \end{aligned}$$

Somit ist β gleich dem Anstieg der Strom-Spannungskennlinie im doppelt logarithmischen Maßstab (Siehe Bild 3.43 !).

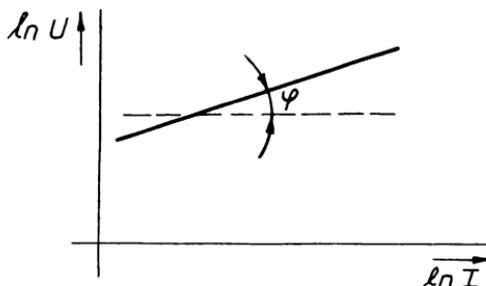


Bild 3.43 Strom-Spannungs-Kennlinie eines Varistors in doppelt logarithmischem Maßstab
 $\tan \varphi = \beta$

Die Größe C ist nicht die Eigenkapazität des Varistors, sondern eine Konstante, die von Typ zu Typ verschieden sein kann. Sie ist zahlenmäßig gleich der Spannung in Volt, bei der durch den Varistor ein Strom von $1A$ fließt. Die Größe der Konstanten C wird bei einem gegebenen Werkstoff durch die geometrischen Abmessungen der Scheibe bestimmt. Zu beachten ist, daß C zwar direkt proportional der Scheibendicke d ist, aber zu dem Scheibenquerschnitt A in einem nichtlinearen Zusammenhang steht:

$$C \sim \frac{d}{A^\beta} \quad (3.16)$$

Das bedeutet, daß eine Änderung des Scheibenquerschnitts um den Faktor ρ nur zu einer Änderung des C -wertes um den Faktor ρ^β führt.

3.2.2. Statischer Widerstand

Wird in der Kennlinie nach Bild 3.42 ein Arbeitspunkt A_1 gewählt, so erhält man die zugehörigen Strom- und Spannungswerte I_1 und U_1 . Daraus läßt sich ein Gleichstromwiderstand berechnen, der als statischer Widerstand bezeichnet wird:

$$R_s = \frac{U_1}{I_1} \quad (3.17)$$

Der statische Widerstand ist vom Arbeitspunkt abhängig. Je größer der Strom und damit die Spannung gewählt werden, umso kleiner wird der statische Widerstand (Siehe Bild 3.44!).

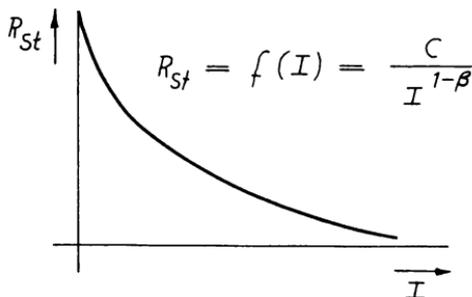


Bild 3.44 Statischer Widerstand eines Varistors in Abhängigkeit vom Strom

Veranschaulicht werden kann der statische Widerstand als Neigung der Geraden, die den Arbeitspunkt A_1 mit dem Ursprung verbindet. Der statische Widerstand ist bei der gleichstrommäßigen Dimensionierung einer Schaltung heranzuziehen. Bei Untersuchung des Wechselstromverhaltens ist statt seiner der dynamische Widerstand zu verwenden.

3.2.3. Dynamischer Widerstand

Wenn um den eingestellten Arbeitspunkt A_1 herum mit sehr kleinen Änderungen von Strom oder Spannung der Varistor angesteuert wird, muß der dynamische Widerstand benutzt werden. Denn für differentiell kleine Änderungen gilt nicht mehr die Gleichung (3.17), sondern man muß setzen:

$$R_{dyn} = \frac{dU}{dI} \quad (\text{Vgl. Bild 3.45 !}).$$

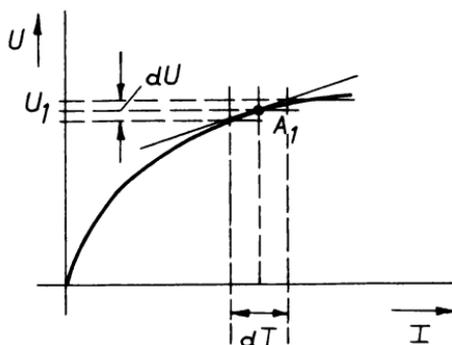


Bild 3.45 Zur Definition des dynamischen Widerstandes eines Varistors

Der dynamische Widerstand kann also als die Steilheit der Tangente an die Kennlinie im Punkte A_1 aufgefaßt werden. Der mathematische Zusammenhang zwischen Arbeitspunkt und dynamischem Widerstand läßt sich durch die Differentiation der all-

gemeinen U-I-Kennlinie klären:

$$\begin{aligned}
 U &= C \cdot I^\beta \\
 R_{dyn} &= \frac{dU}{dI} = C \cdot \beta \cdot I^{\beta-1} \\
 C &= \frac{U}{I^\beta} \quad R_{dyn} = \frac{U}{I^\beta} \cdot \beta \cdot I^{\beta-1} \\
 R_{dyn} &= \beta \cdot U \cdot I^{\beta-1} \cdot I^{-\beta} = \beta \cdot U \cdot I^{-1} = \beta \cdot \frac{U}{I}
 \end{aligned}$$

Mit $\frac{U}{I} = R_s$ erhält man:

$$R_{dyn} = \beta \cdot R_s \quad (3.18)$$

Da in der Praxis der β -Wert etwa zwischen 0,17 und 0,30 liegt, ergibt sich, daß der dynamische Widerstand immer kleiner als der statische Widerstand ist.

3.2.4. Temperaturabhängigkeit der elektrischen Eigenschaften

Wenn man die Strom-Spannungs-Kennlinie eines Varistors bei zwei verschiedenen Temperaturen aufnimmt und im doppelt logarithmischen Maßstab darstellt -(Vgl. Bild 3.46 !)-, so erkennt man, daß der β -Wert nur sehr wenig von der Temperatur abhängig ist; denn die Neigung der beiden Geraden hat sich nicht merklich geändert. Dagegen ist der C-Wert deutlich temperaturabhängig. Die bei verschiedenen Temperaturen gemessenen Kennlinien werden parallel zueinander verschoben. Es ist ersichtlich, daß C einen negativen Temperaturkoeffizienten aufweist, der Widerstandswert sinkt also mit steigender Temperatur.

Innerhalb des zulässigen Temperaturbereiches kann näherungsweise gesetzt werden:

$$C = C_0 (1 + TK_C \Delta T)$$

Darin bedeuten:

- C_0 der C-Wert bei einer bestimmten Bezugs-
temperatur;
- C der C-Wert bei der Übertemperatur ΔT ;
- TK_C der Temperaturkoeffizient des C.

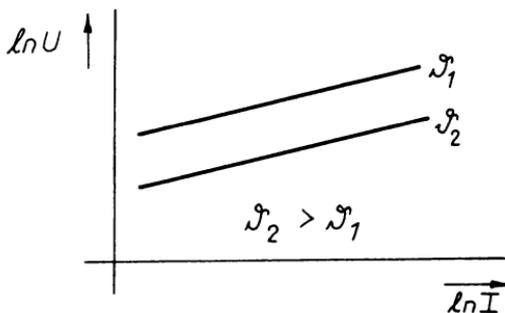


Bild 3.46 Strom-Spannungs-Kennlinie eines Varistors, gemessen bei zwei verschiedenen Temperaturen

Der Temperaturkoeffizient TK_C ist bei den einzelnen Typen etwas verschieden. Er liegt meist in der Größenordnung um

$$TK_C \approx -0,15 \text{ \%/}^\circ\text{C}.$$

Wenn man untersucht, wie sich die Spannung bei konstantem Strom mit der Temperatur ändert, dann erhält man:

$$TK_U = \frac{\Delta U}{U} \cdot \frac{1}{\Delta J}.$$

Bei $I = \text{konst.}$ gilt:

$$\Delta U = \Delta C \cdot I^\beta$$

$$\frac{\Delta U}{U} = \Delta C \cdot \frac{I^\beta}{U}.$$

Mit $U = C \cdot I^\beta$ wird daraus:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{\Delta C \cdot I^\beta}{C \cdot I^\beta} = \frac{\Delta C}{C}.$$

$$TK_U = \frac{\Delta C}{C} \cdot \frac{1}{\Delta J} = TK_C$$

$$TK_U = TK_C.$$

Bei konstantem Wert des Stromes ist also der Temperaturkoeffizient der Spannung gleich dem TK_C .

Betrachtet man andererseits den Temperaturverlauf des Stromes bei konstanter Spannung, dann ergibt sich:

$$U = C \cdot I^\beta \longrightarrow I = C^{-\frac{1}{\beta}} \cdot U^{\frac{1}{\beta}}$$

$$I = K \cdot C^\gamma$$

Wir setzen: $U^{\frac{1}{\beta}} = K$
 $-\frac{1}{\beta} = \gamma$

$$\frac{dI}{dC} = K \cdot \gamma \cdot C^{\gamma-1}$$

$$dI = K \cdot \gamma \cdot C^{\gamma-1} \cdot dC$$

$$\Delta I = K \cdot \gamma \cdot C^{\gamma-1} \cdot \Delta C$$

man bildet den Übergang:
 $dI \longrightarrow \Delta I$

Es gilt: $C = C_0(1 + TK_C \cdot \Delta \mathcal{J}) = C_0 + \Delta C$.

Daraus folgt: $\Delta C = C_0 \cdot TK_C \cdot \Delta \mathcal{J}$.

Bei nicht allzu großem $\Delta \mathcal{J}$ ist $C_0 \cdot \Delta \mathcal{J} \cdot TK_C \approx C \cdot \Delta \mathcal{J} \cdot TK_C$.

Damit wird: $\Delta I = K \cdot \gamma \cdot C^{\gamma-1} \cdot C \cdot TK_C \cdot \Delta \mathcal{J} = K \cdot \gamma \cdot C^\gamma \cdot TK_C \cdot \Delta \mathcal{J}$.

Mit $I = K \cdot C^\gamma$ wird daraus:

$$\Delta I = I \cdot \gamma \cdot TK_C \cdot \Delta \mathcal{J}.$$

Mit der Definition des Temperaturkoeffizienten des Stromes

$$TK_I = \frac{\Delta I}{I} \cdot \frac{1}{\Delta \mathcal{J}} \text{ ergibt sich: } TK_I = \gamma \cdot TK_C = -\frac{TK_C}{\beta}.$$

Der Temperaturkoeffizient des Stromes ist also immer größer als der Temperaturkoeffizient des C-Wertes. Für $\beta = 0,2$ ergibt sich beispielsweise mit $TK_C = -0,15\% / ^\circ C$ ein $TK_I = +0,75\% / ^\circ C$.

3.2.5. Belastbarkeit

Aus der Gleichung (3.14) erhält man für die am Varistor umgesetzte Leistung

$$N = U \cdot I = C \cdot I^{1+\beta}.$$

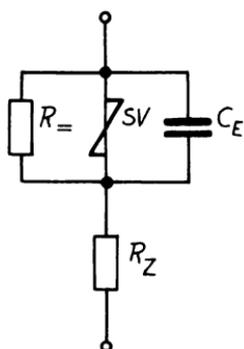
Diese Leistung darf nicht zu einer unzulässig hohen Erwärmung des Widerstandes führen. Die obere Temperaturgrenze ist in der Regel durch den Schmelzpunkt des Lotes gegeben, mit dem die Kontakte an dem eigentlichen Varistorkörper befestigt sind. Das Halbleitermaterial selbst könnte bis zu Temperaturen von

300 °C betrieben werden, aber durch das Lot ist die höchste zulässige Erwärmung auf 120 °C begrenzt.

Bei den vom VEB Keramische Werke Hermsdorf gefertigten Typen ist die auf das Gewicht bezogene Energie, die benötigt wird, um den Varistor von 20 °C auf 120 °C zu erwärmen, mit etwa 60 Ws/p angegeben. Die Belastbarkeit richtet sich - wie zu erwarten - nach der Scheibengröße.

3.2.6. Wechselfspannungsverhalten

In Bild 3.47 ist das vereinfachte Ersatzschaltbild eines Varistors angegeben. Von Bedeutung für das Wechselfspannungsverhalten ist sowohl der eigentliche SV-Widerstand als auch die Eigenkapazität C_E .



$R=$ linearer Anteil, bedingt durch Leitungsmechanismus im Inneren der Silizium-Karbid-Körner

SV nichtlinearer Anteil, bedingt durch Leitungsmechanismus in den Übergangszonen zwischen den Si-C-Körnern

C_E Eigenkapazität

R_Z linearer Widerstand der Zuleitungen und Kontaktierungen

Bild 3.47 Vereinfachtes Varistor-Ersatzschaltbild

Die Eigenkapazität ist bedingt durch die Dielektrizitätskonstante des Werkstoffes und hängt natürlich von der Scheibengröße ab. Durch diese unerwünschte Kapazität wird bewirkt, daß der Varistor - insbesondere die scheibenförmigen Typen - bei

höheren Frequenzen eine Phasenverschiebung zwischen U und I hervorruft. Dieser Einfluß kann nur bis zu Frequenzen von ca. 200 Hz vernachlässigt werden.

Liegt an einem Varistor eine Wechselspannung, so wird auf Grund der nichtlinearen Kennlinie der hindurchfließende Strom stark verzerrt; wird andererseits ein bestimmter Stromverlauf eingepreßt, so erhält man eine stark verzerrte Wechselspannung (Bilder 3.48 u. 3.49).

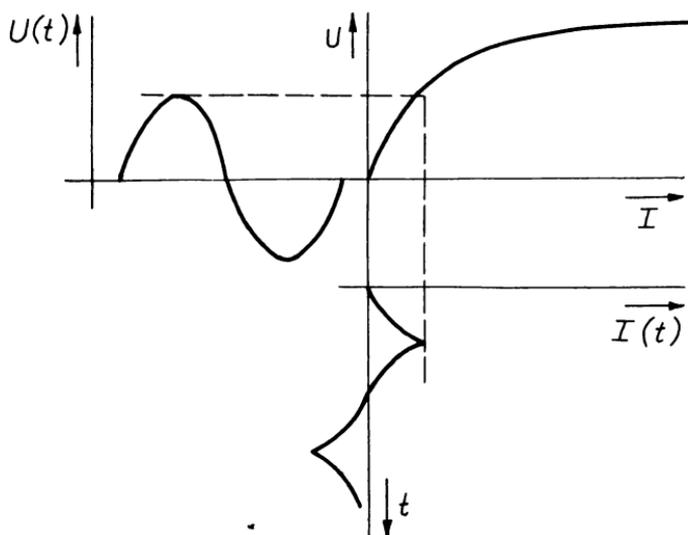


Bild 3.48 Stromverzerrung bei aufgeprägter sinusförmiger Spannung

Der Grad der Verzerrung ist abhängig vom Nichtlinearitätskoeffizienten β . Da die verzerrende Kennlinie symmetrisch ist, können nur ungeradzahlige Harmonische vorhanden sein. Nachstehende Tabelle zeigt den Anteil der Harmonischen in Abhängigkeit vom β -Wert./10/
 Ein für die Praxis besonders wichtiger Fall ist der Betrieb mit sinusförmigem Wechselstrom. Da bei Sinusgrößen häufig der Effektivwert angegeben wird, andererseits aber die bis-

Anteil der Harmonischen bei Varistoren in Abhängigkeit von β

Nichtlinearitätskoeff.	Erste Harmonische	Dritte Harmonische
0,5	0,85	0,17
0,333	0,75	0,25
0,25	0,68	0,29
0,222	0,65	0,30
0,2	0,625	0,31
0,182	0,6	0,32
0,167	0,58	0,32
0,154	0,56	0,33
0,143	0,55	0,33

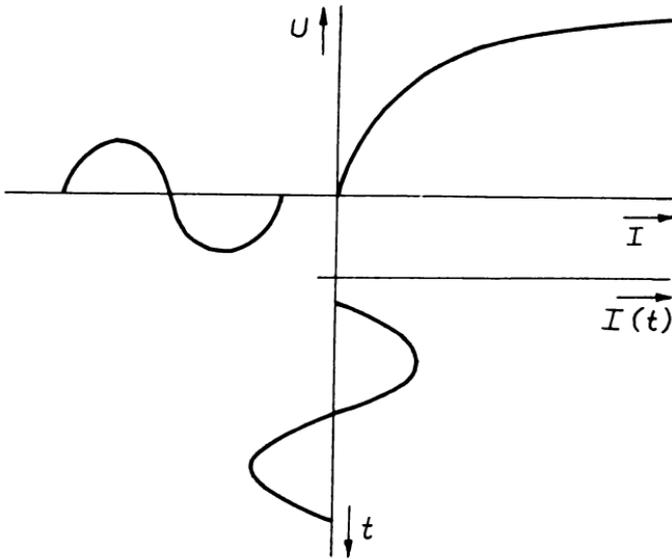


Bild 3.49 Spannungsverzerrung bei aufgeprägtem sinusförmigen Strom

her besprochenen Zusammenhänge auf Gleichstrom bezogen waren, empfiehlt es sich, entsprechende Umrechnungsfaktoren zu entwickeln. Einzelheiten hierzu sind der Literatur /11/ zu entnehmen.

3.2.7. Schaltungstechnik

Wenn gemäß Bild 3.50 n gleiche Varistoren in Reihe geschaltet werden, so gilt: $U_{ges} = U_1 + U_2 + \dots + U_n = C_1 \cdot I^{\beta_1} + C_2 I^{\beta_2} + \dots + C_n I^{\beta_n}$

$$U_{ges} = \sum_{i=1}^n C_i \cdot I^{\beta_i}$$

Und für n gleiche Widerstände:

$$U_{ges} = n \cdot C \cdot I^{\beta}$$

$$\text{d.h.: } C_{ges} = n \cdot C$$

Bei der Parallelschaltung von n gleichen Varistoren ergibt sich:

$$I_{ges} = I_1 + I_2 + \dots + I_n = \sum_{i=1}^n \left(\frac{U}{C_i} \right)^{\frac{1}{\beta_i}}$$

Für n gleiche Widerstände:

$$I_{ges} = n \cdot \left(\frac{U}{C} \right)^{\frac{1}{\beta}}$$

$$\text{d.h.: } C_{ges} = \frac{C}{n^{\beta}}$$

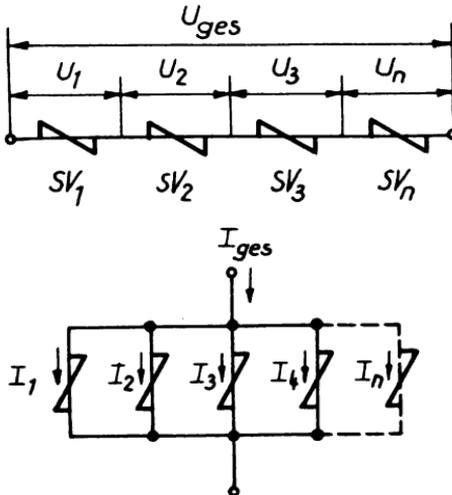


Bild 3.50 Zur Reihen- und Parallelschaltung von Varistoren

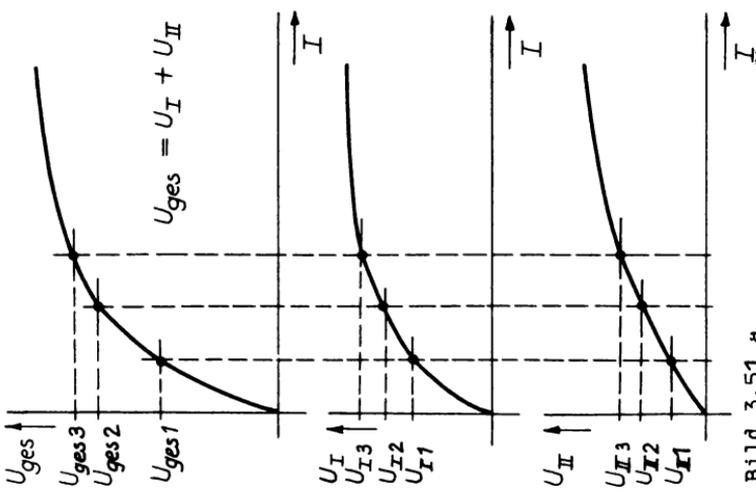


Bild 3.51 a

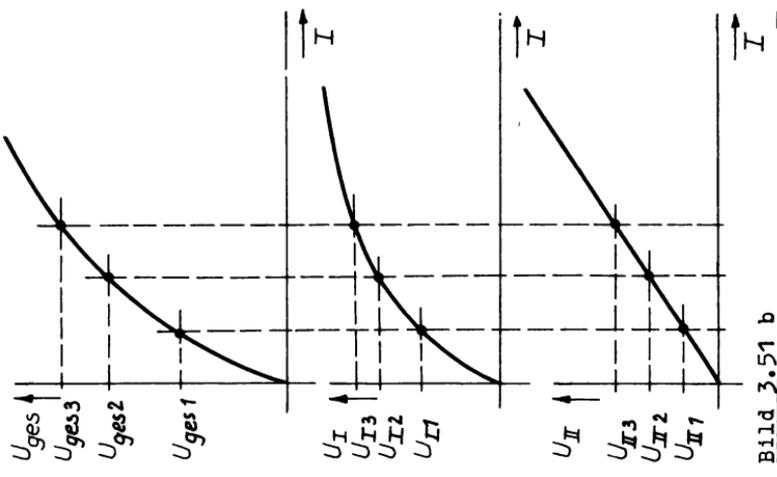


Bild 3.51 b

Bilder 3.51 Grafische Behandlung der Reihenschaltung von a) Varistoren

b) Varistor und linearem Widerstand

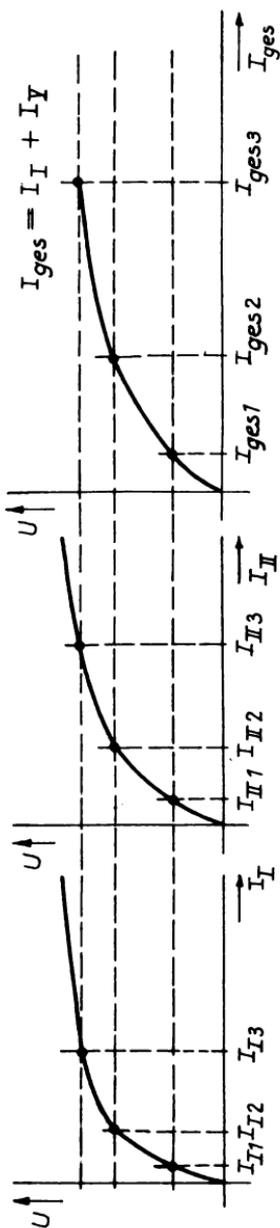


Bild 3.52 a

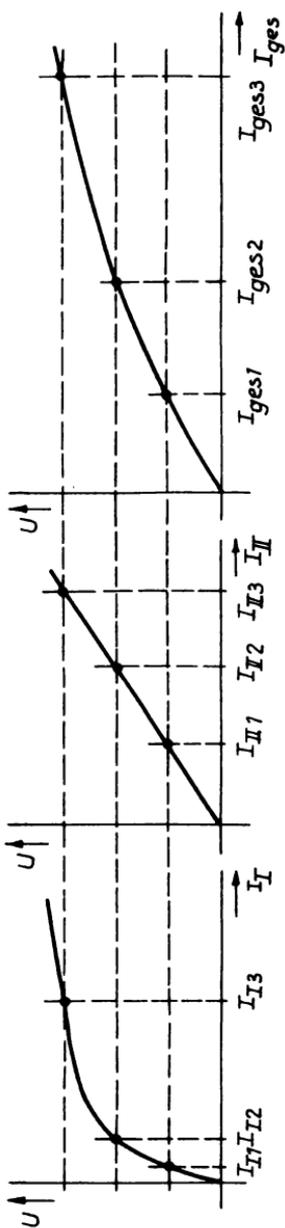


Bild 3.52 b

Bilder 3.52 Grafische Behandlung der Parallelschaltung von a) Varistoren

b) Varistor und linearem Widerstand

Eine Halbierung des resultierenden C-Wertes läßt sich also bei einem $\beta = 0,2$ erst durch Parallelschaltung von $n = 2^{\frac{1}{\beta}} = 32$ gleichartigen Varistoren erreichen. Parallelschaltung von Varistoren ist demnach nur sinnvoll hinsichtlich der Vergrößerung der Belastbarkeit und nicht zum Zweck einer Verringerung des C-Wertes. Liegt der Varistor mit einem linearen Widerstand in Reihe, so gilt für die Spannung an der Kombination:

$$U_{ges} = I \cdot R + C \cdot I^{\beta}.$$

Liegt zu einem Varistor ein linearer Widerstand parallel, so gilt für den durch die Kombination fließenden Strom:

$$I_{ges} = \frac{U}{R} + \left(\frac{U}{C}\right)^{\frac{1}{\beta}}.$$

Eine geschlossene mathematische Behandlung dieser Fälle ist recht umständlich und teilweise gar nicht möglich, weshalb es sich empfiehlt, mit den in den Bildern 3.51 und 3.52 dargestellten grafischen Verfahren zu arbeiten.

3.2.8. Alterung

Die Varistoren sind ihrer Struktur nach Sinterkörper aus einer Vielzahl kleinster Teilchen. Ihr elektrisches Verhalten wird in erster Linie von den Übergangszonen zwischen diesen Körnern bestimmt. Diese Kontaktstellen altern bei starker thermischer Belastung. Die Alterung äußert sich in einer Verschiebung der U-I-Kennlinie zu höheren Spannungen; der Varistor wird hochohmiger. Andererseits können durch hohe örtliche Feldstärken einige dieser Übergangszonen durchschlagen werden, so daß eine Verschiebung der U-I-Kennlinie nach tieferen Spannungswerten erfolgt.

Wie groß die im Betrieb auftretende Alterung ist, hängt von der Belastung ab. Bei sehr geringer Belastung und vorhergegangener künstlicher Alterung läßt sich als Optimum der Stabilität eine Alterung von 0,2% nach 1000 Betriebsstunden erreichen.

Bei Betrieb mit den maximal zulässigen Bedingungen ohne künstliche Alterung muß mit einer Alterung von 5% des Spannungswertes nach 1000 Betriebsstunden gerechnet werden.

Bei längerer Betriebsdauer nimmt die Alterungsneigung ab. Die größte Alterungsrate tritt stets in den ersten Betriebsstunden auf.

3.2.9. Messungen von C und β

Zur Ermittlung von C und β eines Varistors benutzt man zweckmäßigerweise die Schaltung nach Bild 3.53 a.

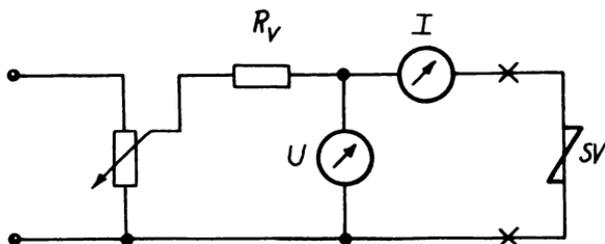
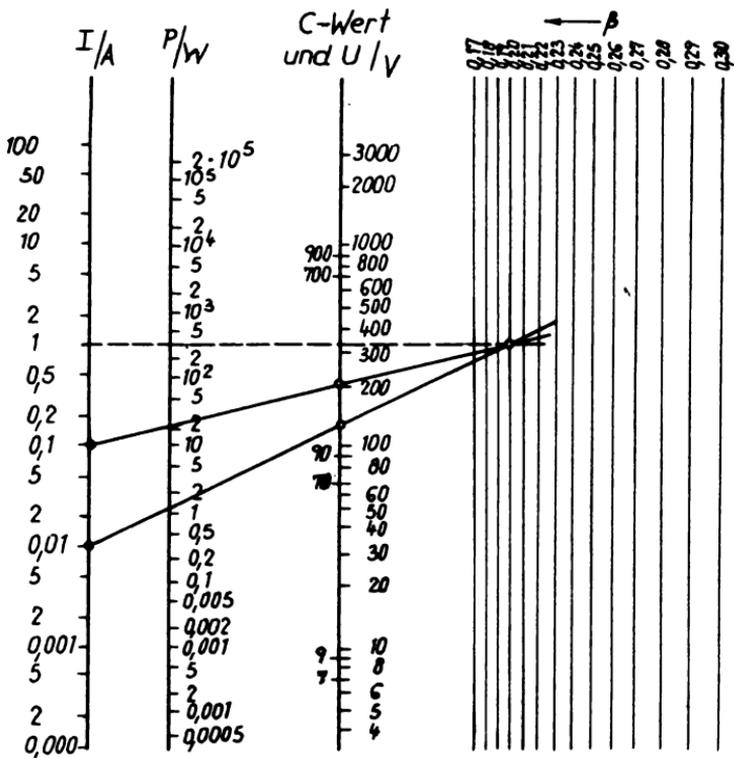


Bild 3.53 a Meßschaltung zur Bestimmung des C und β -Wertes

Ausgehend von der Gleichung (3.14)

$$\text{kann man setzen: } C = \frac{U}{I^\beta} \quad \text{und} \quad \beta = \frac{\ln\left(\frac{U_1}{U_2}\right)}{\ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right)} .$$

Die etwas umständliche Rechenarbeit zur Bestimmung von β und C kann vermieden werden, wenn man das Nomogramm nach Bild 3.53 b anwendet. Es sind lediglich zwei Strommessungen und zwei Spannungsmessungen erforderlich, die auf den entsprechenden Skalen zu markieren sind. Die zueinander gehörigen U - I -Werte sind durch Geraden zu verbinden. Der Schnittpunkt der beiden Geraden ergibt den β -Wert. Wird der Schnittpunkt P mit dem Stromwert $1A$ verbunden, so kann auf der Spannungsskala der C -Wert abgelesen werden. Außerdem ergibt sich im Schnittpunkt mit der P -Achse der bei den jeweiligen Betriebsbedingungen umgesetzte Leistungsbetrag.



Beispiel: $I_1 = 10 \text{ mA}$, $I_2 = 100 \text{ mA}$,
 $U_1 = 125 \text{ V}$, $U_2 = 200 \text{ V}$;
 ergibt: $\beta = 0,2$; $C = 330$.

Bild 3.53 b U-I-C- β -Nomogramm

3.2.10. Anwendung von Varistoren

3.2.10.1. Spannungsstabilisierung (Siehe Literatur /11/).

Eine elektronische Spannungsstabilisierung wird in ihrer Güte von einer Stabilisierung mit Varistoren nicht erreicht, aber die Verwendung von Varistoren bietet den Vorteil, daß die Schaltung sehr einfach aufzubauen ist und daß die Kosten niedriger sind. Für diejenigen Fälle, bei denen der Stabilisierungsfaktor keine allzu hohen Werte besitzen muß, kann daher der Einsatz von Varistoren sinnvoll sein.

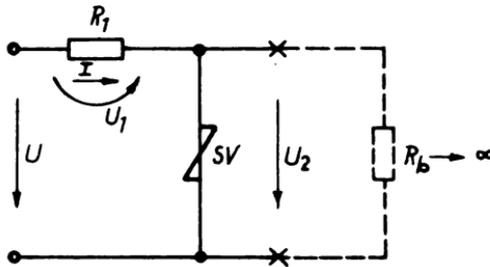


Bild 3.54 Spannungsstabilisierung mittels Varistor (ohne Belastung)

In Bild 3.54 ist eine einfache Schaltung skizziert. Dabei werde zunächst angenommen, daß der Belastungswiderstand sehr hoch sein soll, die Schaltung also praktisch nicht belastet wird. Mit den bekannten Gesetzmäßigkeiten gilt:

$$U_{ges} = U_1 + U_2 \quad , \quad U_1 = R_1 \cdot I \quad , \quad U_2 = C \cdot I^\beta \quad .$$

Wenn sich die Eingangsspannung um einen kleinen Betrag ΔU ändert, so folgt daraus eine Stromänderung ΔI :

$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 = \Delta I \cdot R_1 + \Delta I \cdot R_{dyn} \quad .$$

Wenn man $R_{dyn} = \beta \cdot R_S = \beta \frac{U_2}{I}$ einsetzt, so ergibt sich:

$$\Delta U = \Delta I \cdot R_1 + \Delta I \cdot \beta \cdot \frac{U_2}{I}$$

$$\Delta U = \Delta I \left(R_1 + \beta \cdot \frac{U_2}{I} \right)$$

$$\Delta I = \frac{\Delta U \cdot I}{I \cdot R_1 + \beta \cdot U_2} \quad .$$

Für die Änderung der Ausgangsspannung erhält man:

$$\Delta U_2 = \Delta I \cdot R_{dyn} = \beta \cdot \frac{U_2}{I} \cdot \Delta I$$

$$\Delta U_2 = \frac{\Delta U \cdot I}{I \cdot R_1 + \beta \cdot U_2} \cdot \beta \cdot \frac{U_2}{I}$$

$$\frac{\Delta U_2}{U_2} = \frac{\beta}{I} \cdot \frac{\Delta U \cdot I}{I \cdot R_1 + \beta \cdot U_2} = \frac{\beta}{U_1 + \beta \cdot U_2} \cdot \Delta U$$

Man definiert den Stabilisierungsfaktor als das Verhältnis der relativen Schwankungen der Eingangsspannung zu den relativen Schwankungen der Ausgangsspannung:

$$S = \frac{\frac{\Delta U}{U}}{\frac{\Delta U_2}{U_2}}$$

$$S = \frac{\frac{\Delta U}{U}}{\frac{\beta \cdot \Delta U}{U_1 + \beta \cdot U_2}} = \frac{U_1 + \beta \cdot U_2}{\beta \cdot U}$$

Wenn $x = \frac{U_2}{U_1}$ und $U_1 = U - U_2$ gesetzt wird, dann ergibt sich:

$$S = \frac{1}{\beta} - \frac{1-\beta}{\beta} \cdot x \quad (3.19)$$

Aus der Gleichung ist zu entnehmen, daß der Stabilisierungsfaktor vom Verhältnis $x = \frac{U_2}{U}$ und vom β -Wert des Varistors abhängig ist.

In Bild 3.55 ist der Stabilisierungsfaktor in Abhängigkeit von x mit β als Parameter dargestellt.

Wenn der Abschlußwiderstand nicht als sehr groß angesehen und vernachlässigt werden kann, also eine Schaltung gemäß Bild 3.56 vorliegt, dann gilt:

$$I_1 = \frac{U_2}{R_s} \quad , \quad I_2 = \frac{U_2}{R_2} \quad , \quad R = \frac{U_1}{I_1 + I_2}$$

$$R = \frac{U_1}{\frac{U_2}{R_s} + \frac{U_2}{R_2}}$$

$$R = \frac{U_1 \cdot R_s \cdot R_2}{U_2 (R_s + R_2)}$$

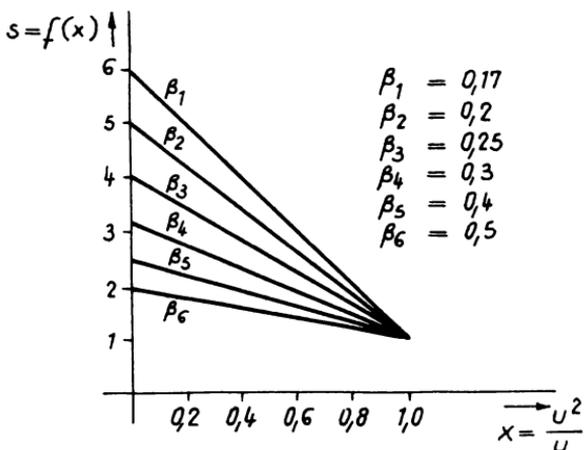


Bild 3.55 Stabilisierungsfaktor s in Abhängigkeit vom Spannungsteilverhältnis für die Schaltung nach Bild 3.54
 $\beta =$ Parameter

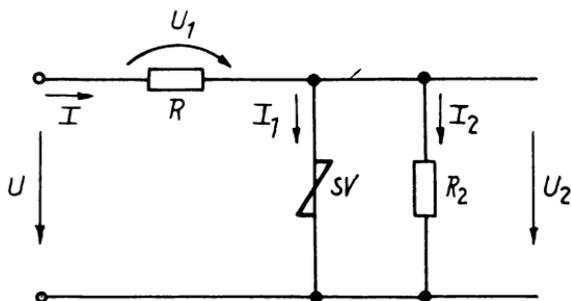


Bild 3.56 Spannungsstabilisierung mittels Varistor (mit Belastung)

Wenn man $U_1 = U - U_2$ und $x = \frac{U_2}{U}$ einführt, dann ergibt sich für den Vorwiderstand R :

$$R = \left(\frac{1}{x} - 1 \right) \cdot \frac{R_s \cdot R_2}{R_s + R_2} \quad (3.20)$$

Der Stabilisierungsfaktor ist definitionsgemäß

$$S = \frac{\frac{\Delta U}{U}}{\frac{\Delta U_2}{U_2}} = \frac{\Delta U \cdot U_2}{U \cdot \Delta U_2} = \frac{\Delta U}{\Delta U_2} \cdot x$$

Führt man für den durch R_S und R_2 gebildeten **Stromteiler** die Abkürzung y ein

$$y = \frac{R_S}{R_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad /$$

dann erhält man über einige Zwischenrechnungen:

$$S = \frac{1}{\beta} - \frac{1-\beta}{\beta} \cdot \frac{x+y}{1+y} \quad (3.21)$$

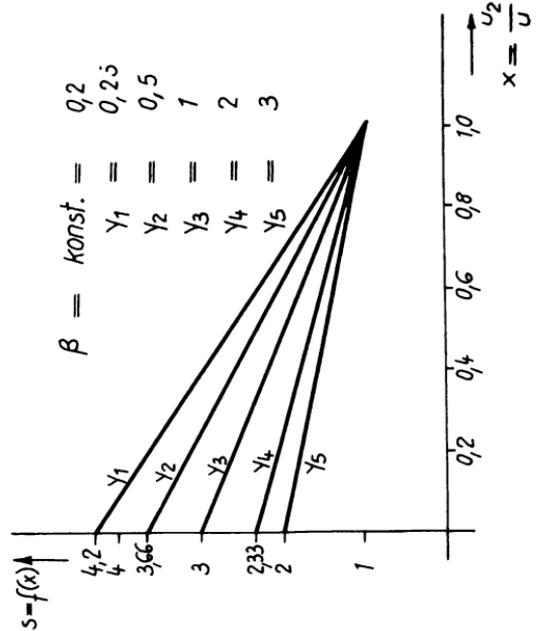
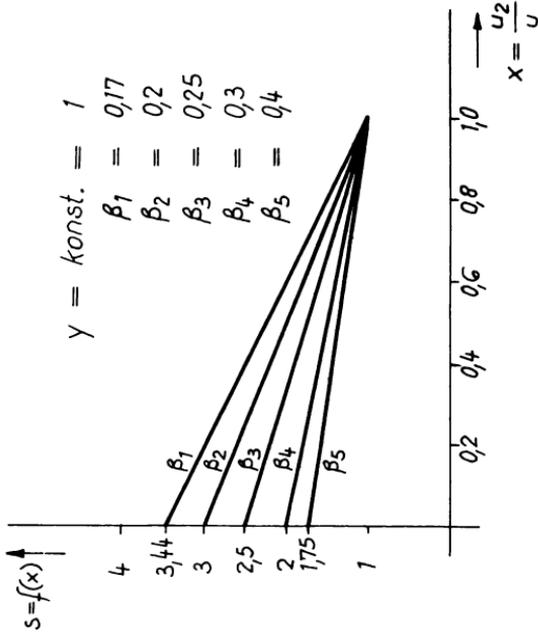
Für einen unbelasteten Spannungsteiler - d.h. für $y=0$ - geht diese Beziehung in die Gleichung (3.19) über.

Die grafische Auswertung zeigt Bild 3.57.

Bei den bisherigen Betrachtungen war immer davon ausgegangen worden, daß die Belastung konstant sei und die Eingangsspannung schwanke. Es interessiert jedoch auch der Fall einer konstanten Eingangsspannung, die über einen Spannungsteiler einen Verbraucher unterschiedlicher Stromaufnahme speisen soll. Dabei sollen Änderungen der Belastung möglichst keine Änderungen der Ausgangsspannung zur Folge haben. Oder es kann ein veränderlicher Widerstand über einen Vorwiderstand aus einer Konstantspannungsquelle zu betreiben sein, und Änderungen des Widerstandes sollen möglichst geringen Einfluß auf das Spannungsteilerverhältnis ausüben.

In diesen Fällen erweist sich die Verwendung eines Varistors als sehr zweckmäßig. Die entsprechenden Schaltungen sind in den Bildern 3.58a und 3.58c skizziert.

Die Ausgangsgleichspannung U_2 wird aus der Eingangsgleichspannung gewonnen, und zwar nach einem Spannungsteilerverhältnis, das von den statischen Widerständen bestimmt wird. Eine Änderung der Belastung hat eine Änderung des Stromes durch den Varistor zur Folge. Die dadurch am Varistor in Erscheinung tretende Spannungsänderung ist jedoch nur über den dynamischen Widerstand mit ΔI verknüpft. Die Ausgangsspannung wird sich folglich nur wenig ändern.



a) $y = \frac{I_2}{I_1} = \text{konst.} = 1$
 $\beta = \text{Parameter}$

b) $\beta = \text{konst} = 0,2$
 $\gamma = \text{Parameter}$

! 30 !
Bilder 3.57 Stabilisierungsfaktor s in Abhängigkeit vom Spannungsteilerverhältnis für die Schaltung nach Bild 3.56

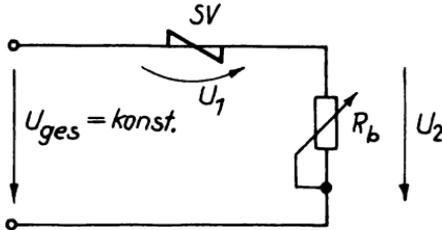


Bild 3.58 a Varistor als Vorwiderstand

Für Bild 3.58a gilt:

$$U_2 = I \cdot R_b .$$

Eine Änderung von R_b um ΔR_b bringt eine Änderung von U_2 um ΔU_2 und eine Änderung von I um ΔI mit sich. Diese Änderungen sind mathematisch über das totale Differential zu erfassen:

$$dU_2 = \frac{\partial (I \cdot R_b)}{\partial I} \cdot dI + \frac{\partial (I \cdot R_b)}{\partial R_b} \cdot dR_b$$

$$dU_2 = R_b \cdot dI + I \cdot dR_b .$$

Wenn man von den Differentialen auf die Differenzen übergeht, so erhält man:

$$dI \rightarrow \Delta I; dR_b \rightarrow \Delta R_b; dU \rightarrow \Delta U$$

$$\Delta U_2 = R_b \cdot \Delta I + \Delta R_b \cdot I .$$

Da $U_{ges} = \text{konstant}$ vorausgesetzt wurde, gilt:

$$\Delta U_{ges} = 0 = \Delta U_1 + \Delta U_2 ,$$

$$\text{also: } \Delta U_1 = -\Delta U_2 .$$

Für den Varistor kann man setzen: $\Delta U_1 = \Delta I \cdot R_{dyn}$.

Mit $\Delta U_2 = -\Delta U_1$ wird daraus: $\Delta I = -\frac{\Delta U_2}{R_{dyn}}$.

Weiterhin gilt: $I = \frac{U_2}{R_b}$

Somit wird: $\Delta U_2 = -R_b \cdot \frac{\Delta U_2}{R_{dyn}} + I \cdot \Delta R_b$

$$\frac{\Delta U_2}{U_2} \cdot \left(1 + \frac{R_b}{R_{dyn}} \right) = \frac{\Delta R_b}{R_b} .$$

Man kann nun einen Stabilisierungsfaktor als das Verhältnis der Widerstandsänderungen zu den daraus sich ergebenden Spannungsänderungen definieren:

$$S = \frac{\frac{\Delta R_b}{R_b}}{\frac{\Delta U_2}{U_2}} .$$

Mit $R_{dyn} = \beta \cdot R_s$ und $\frac{R_b}{R_s} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{U_2}{U_{ges} U_2} = \frac{x}{1-x}$, worin $x = \frac{U_2}{U_{ges}}$ ist,

erhält man:

$$S = 1 + \frac{x}{1-x} \cdot \frac{1}{\beta} .$$

Die grafische Auswertung zeigt Bild 3.58b.

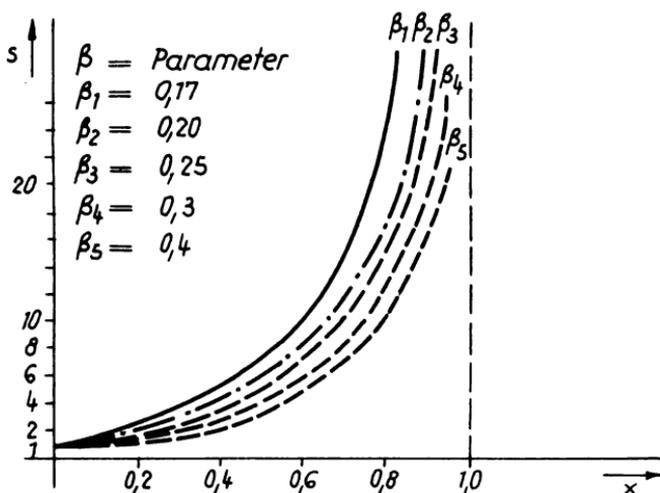
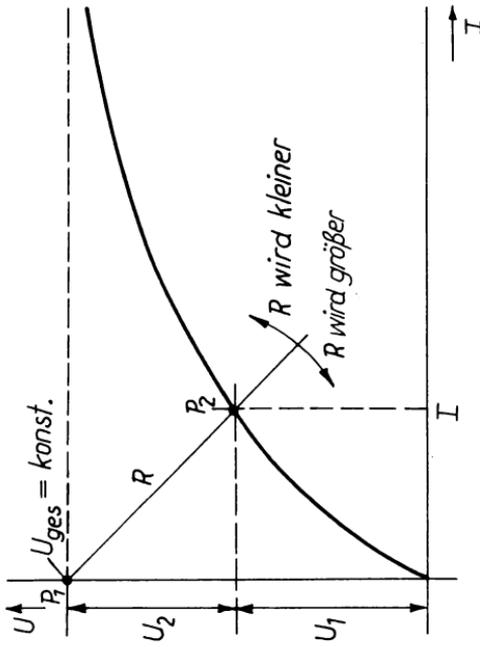


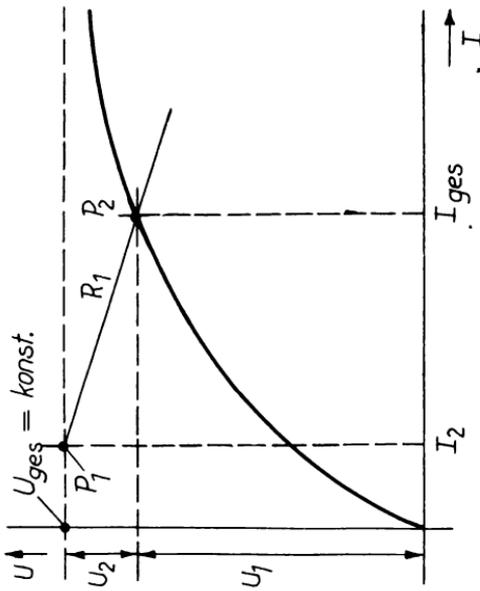
Bild 3.58 b Stabilisierungsfaktor s in Abhängigkeit vom Spannungsteilerverhältnis nach Bild 3.58 a

In Bild 3.59 ist ein grafisches Verfahren zur Ermittlung der Schwankung der Ausgangsspannung angegeben.



In die Varistorkennlinie wird zuerst der Wert für $U_{Ges} = \text{konst.}$ eingezeichnet. Von Punkt P_1 aus wird die Kennlinie für R (Gerade) gezeichnet. Es ergibt sich der Punkt P_2 als Schnittpunkt mit der Varistorkennlinie. Wenn von P_2 auf die U -Achse gebohrt wird, erhält man die beiden Teilspannungen U_1 und U_2 . Eine Änderung des Widerstandes R ist als Änderung der Neigung der Geraden einzuzeichnen; P_1 bleibt erhalten, aber ein neuer P_2 ergibt sich.

Bild 3.59 a Grafische Ermittlung der Spannungsänderung bei einer Widerstandsänderung in der Schaltung Bild 3.58 a



In die Varistorkennlinie werden die Werte $U_{Ges} = \text{konst.}$ und der geforderte Belastungsstrom I_2 eingezeichnet. Man erhält P_1 . Von P_1 aus wird die Widerstandsgerade für R_1 gezeichnet. Man erhält P_2 , und aus diesem ergeben sich die Werte U_2 und U_1 . Eine Änderung der Belastung entspricht einer Änderung von I_2 . Die Gerade R_1 wird also parallel verschoben. Ihre Neigung bleibt konstant! Durch die Parallelverschiebung ergibt sich ein neuer Punkt P_2 mit entsprechend anderen Werten für U_2 und U_1 .

Bild 3.59 b Grafische Ermittlung der Spannungsänderung an einem belasteten Spannungsteiler nach Bild 3.58 c

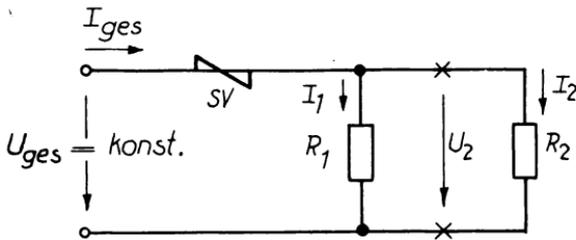


Bild 3.58 c Varistor als Teil eines belasteten Spannungsteilers

Bild 3.58c zeigt eine Schaltung, bei welcher der Varistor als Teil eines belasteten Spannungsteilers wirkt. Hier empfiehlt es sich, die stabilisierende Wirkung anhand des in Bild 3.59b skizzierten Verfahrens grafisch zu ermitteln.

Anwendung finden diese Verfahren in der Rundfunk- und Fernsehempfängertechnik zum Konstanthalten der Bildhöhe bzw. zur Stabilisierung der Schirmgitterspannung.

3.2.10.2. Spannungsbegrenzung

In allen elektrischen Kreisen, in denen Induktivitäten vorhanden sind, können bei Schaltvorgängen mehr oder weniger große Überspannungen auftreten. Diese können andere Bauelemente gefährden oder die Arbeitsweise der Schaltung beeinträchtigen. Es kann deshalb notwendig werden, besondere Maßnahmen zur Spannungsbegrenzung zu treffen. Bild 3.60 stellt eine Schaltung dar, welche die beim Abschalten des Stromes durch die Induktivität entstehende Spannung ableitet und damit Funkenbildung oder gar das Zustandekommen eines Lichtbogens am Schalter verhindert. Nachteilig an dieser Schaltung ist, daß bei geschlossenem Schalter ständig ein Ruhestrom durch den Varistor fließt. Die Induktivität wird dadurch bedämpft, bzw. es treten Energieverluste auf. Dieser Nachteil wird bei der Schaltung nach Bild 3.61 vermieden. Der Varistor liegt hier parallel zum Schalter, begrenzt also nicht die Spannung

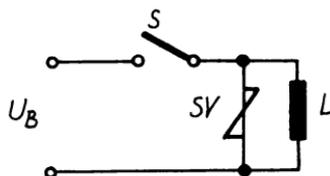


Bild 3.60 Begrenzung von
Schaltüberspannungen bei
 $U_B < 110 \text{ V}$

an der Induktivität, sondern die Spannung an der Schaltstrecke.
Nachteilig ist hier aber, daß auch bei geöffnetem Schalter
ein Strom durch die Induktivität fließt.

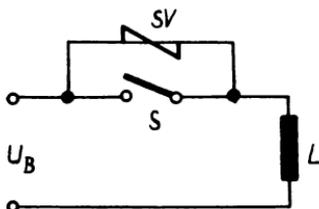


Bild 3.61 Begrenzung
von Schaltüberspannungen
bei $U_B > 110 \text{ V}$

Ein anderes Beispiel für eine Spannungsbegrenzung mittels Varistor zeigt Bild 3.62. In dieser Schaltung aus der Fernsehempfangstechnik hat der Varistor die Aufgabe, die beim Bildrücklauf an der Primärseite des Übertragers entstehenden Spannungsspitzen zu begrenzen. Diese Überspannungen könnten nicht nur Übertrager und Röhre beschädigen, sondern auch den aus Primärinduktivität und Wicklungskapazität gebildeten Schwingkreis zu freien Schwingungen anregen (Bildstörungen). Zu beachten ist, daß durch Zuschalten des Varistors die Röhre zusätzlich belastet wird.

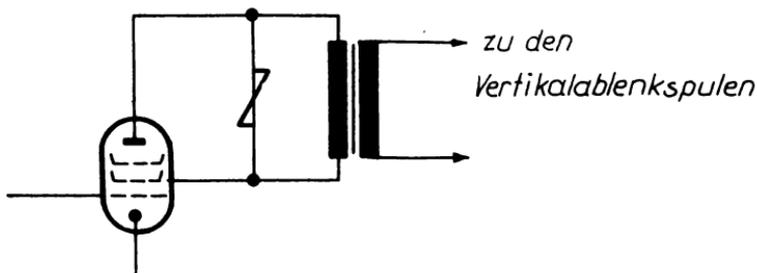


Bild 3.62 Anwendung eines Varistors in der Bild-Endstufe eines TV-Empfängers

3.2.10.3. Linearisierung von Kippspannungen

Das Prinzip der Erzeugung von Kippschwingungen mittels der in Bild 3.63 dargestellten Schaltung kann als bekannt vorausgesetzt werden. Die übliche Kippschaltung ist hier lediglich durch den Spannungsteiler $SV - R_2$ erweitert worden.

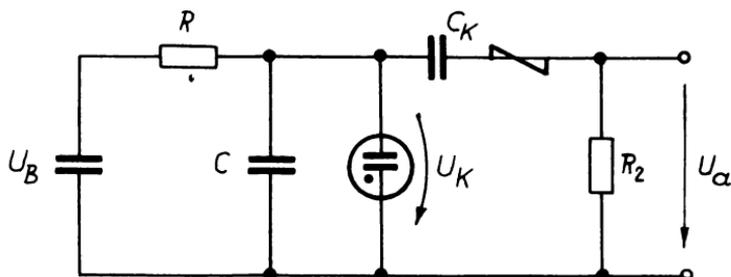


Bild 3.63 Linearisierung einer Sägezahnspannung mittels eines Varistors

Die linearisierende Wirkung dieser Ergänzung kann man sich anhand des Bildes 3.64 leicht klarmachen. Es wird bei dieser Methode die eine Nichtlinearität (Aufladekurve des Kondensators) durch die andere Nichtlinearität (Strom-Spannungskennlinie des Varistors) ausgeglichen. Natürlich kann damit keine hundertprozentige Linearisierung erreicht werden, da die beiden Nichtlinearitäten durch verschiedene mathematische Funktionen beschrieben werden.

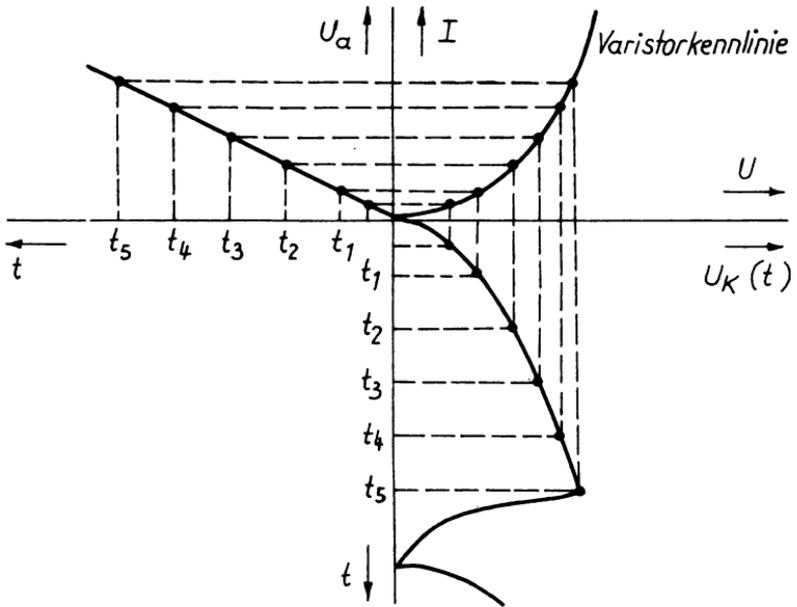


Bild 3.64 Zur Wirkungsweise der Schaltung Bild 3.63

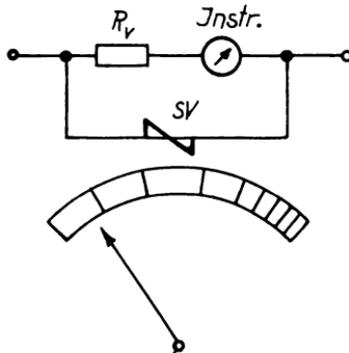


Bild 3.65 Meßbereichs-
dehnung am unteren Ende;
Schaltung und (schematische) Skalenverlauf

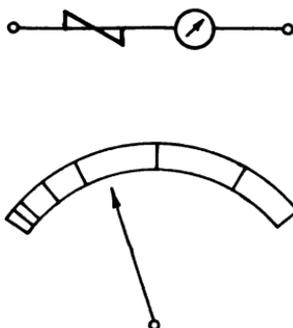


Bild 3.66 Meßbereichs-
dehnung am oberen Ende;
Schaltung und (schema-
tischer) Skalenverlauf

3.2.10.4. Meßbereichsdehnung

Durch Kombination eines Meßwerkes mit einem Varistor kann die Skala des Instrumentes wahlweise für hohe oder niedrige Werte der Meßgröße gedehnt oder gestaucht werden. Die Schaltung nach Bild 3.65 ergibt eine Dehnung der Skala für niedrige Spannungswerte und eine Zusammendrängung am oberen Skalenende. Bild 3.66 stellt die Schaltung für Dehnung am oberen Ende der Skala und Zusammendrängung der niedrigen Werte dar. Die Wirkungsweise kann man sich mittels der $R=f(U)$ -Kennlinie klar machen.

3.2.10.5. Erhöhung der Schaltempfindlichkeit von Relais

Wird gemäß Bild 3.67 ein Relais mit einem Varistor in Reihe geschaltet, dann bewirkt eine Zunahme der Spannung U_e eine stärker als lineare Stromzunahme in der Erregerwicklung. Das Relais ist also in diesem Fall besonders geeignet als Schwellwertschalter; es reagiert mit erhöhter Empfindlichkeit auf das Erreichen bzw. Übersteigen eines bestimmten Spannungswertes.

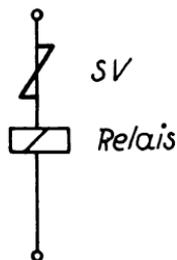


Bild 3.67
Erhöhung der
Spannungsempfind-
lichkeit von Relais

3.2.10.6. Überspannungsableitung

Formal betrachtet gehört dieser Punkt noch zu dem Kapitel "Spannungsbegrenzung". Es soll aber ein besonderer Abschnitt kurz das Wesentlichste zu diesem Thema bringen, da Varistoren durchschnittlicher Eigenschaften den in diesem Anwendungsfall auftretenden Belastungen nicht gewachsen sind.

Die in elektrischen Netzen oder Energieversorgungsanlagen auftretenden Überspannungen können Anlagen, Geräte und Bauelemente gefährden. Deshalb ist eine Begrenzung unbedingt erforderlich.

Die zum Einsatz gelangenden Begrenzer müssen eine hohe Belastbarkeit aufweisen und große Zuverlässigkeit besitzen. Die prinzipiellen elektrischen Eigenschaften (U-I-Kennlinie, Temperaturabhängigkeit usw.) entsprechen den oben bereits behandelten Punkten. Überspannungsableiter erfüllen zusätzlich dazu bestimmte Forderungen bezüglich der Klimafestigkeit und der elektrischen Belastbarkeit. Diese Hochleistungsvaristoren werden nach anderen Gesichtspunkten klassifiziert und geprüft als die Typen geringerer Belastbarkeit. Über diesbezügliche Einzelheiten informieren die Kataloge des Herstellers. Hier sei nur erwähnt, daß Typen mit einer Stoßstrombelastbarkeit bis zu 10 kA gefertigt werden.

3.2.11. Fertigungsprogramm spannungsabhängiger Widerstände

Hersteller ist der VEB Keramische Werke Hermsdorf.

Die spannungsabhängigen Widerstände sind durch einen Buchstaben- und Zahlenschlüssel gekennzeichnet. Alle spannungsabhängigen Widerstände tragen als ersten Buchstaben ein S. Diesem S wird ein weiterer Buchstabe bzw. eine Buchstabengruppe nachgestellt, die den besonderen Verwendungszweck kennzeichnen. Es gilt folgende Zuordnung:

Buchstaben	Bedeutung
SV	Varistoren zur Anwendung in der Schwachstromtechnik
SR	Spannungsabhängige Widerstände in Ringform; Stirnflächen der Ringe metallisiert
SB	Bausteinwiderstände, die durch entsprechende Zusammenstellung der SR - Typen komplettiert werden
SBS	Spannungsabhängige Bausteinwiderstände in Sonderausführung
SRS	Steuerringe
SS	Stabwiderstände
SÜ	Spannungsabhängige Widerstände speziell für Überspannungsableitung
SW	Spannungsabhängige Widerstände in Scheibenform, die sich durch hohe Stoßstromfestigkeit auszeichnen

An die Buchstabengruppe schließt sich eine Zifferngruppe an, welche aus zwei Zahlen zusammengesetzt ist, die durch einen Schrägstrich getrennt sind. Die erste Zahl gibt in V die Spannung an, die über dem Widerstand abfällt, wenn der hinter dem Schrägstrich stehende Strom in mA hindurchfließt. Die auf diese Angabe folgende, durch einen Querstrich getrennte Zahl kennzeichnet die Bauform. Falls sie wiederum aus zwei Zahlen besteht, dann gibt die erste den Durchmesser in mm an, die zweite die Höhe bzw. Länge in mm.

Beispiel: SV 270/10 - 44 ist ein spannungsabhängiger Widerstand (Varistor) in Scheibenform mit einem Durchmesser von 44 mm; bei einem Strom von 10 mA beträgt der Spannungsabfall 270 V.

Folgende Tabelle gibt einen Überblick über das vom VEB KWH gefertigte Spektrum spannungsabhängiger Widerstände.

Typenreihe	Nennstrom mA	Nennspannung V	P bei 120 °C W	β
SV	1	82 - 270	2,0	0,18
	10	22 - 1300	0,5 - 3,5	0,18 - 0,3
	10	10 - 680	3,5 ; 10	0,5 - 0,6
SR	100	1,5 - 22	3,5	0,8
	1000	0,68 - 3,3	3,5	0,8
SB	10	47 - 10000	17,5 - 170	0,5 - 0,6
	100	10 - 470	17,5 ; 35	0,8
	1000	6,8 - 33	17,5 ; 35	0,8
SW	100 - 150	30 - 120	5,0	0,35 - 0,4

Typenreihe	Nennspannung kV	Betriebsspannung V	Restspg. bei Nennableitstoßstrom kV	Nennableitstoßstrom (Welle 8/20) kA	Betriebsstrom mA
SBS	kV	V	kV	kA	mA
	6 - 30	400-2000	45 - 195	2,5	15

Typenreihe	Nennableitstoßstrom kA	Nennrestspannung kV	Langwellenableitstoßstrom A	Langwellenableitstoßdauer μ s
SÜ	kA	kV	A	μ s
	1,5 - 10	1,7 - 5,0	50 - 200	1000 - 2000

Eine einfache Möglichkeit, aus der Angabe von Nennstrom und Nennspannung bei bekanntem β -Wert den C-Wert zu ermitteln, ist durch das Nomogramm Bild 3.68 gegeben. Dabei werden zunächst in der skizzierten Weise die Strom- und Spannungswerte durch eine Gerade verbunden. Dann sucht man auf der unteren Abszisse den entsprechenden β -Wert auf und findet auf der C-Ordinate den gesuchten C-Wert.



$U = C \cdot J^\beta$
C: Formfaktor
β: Regelfaktor

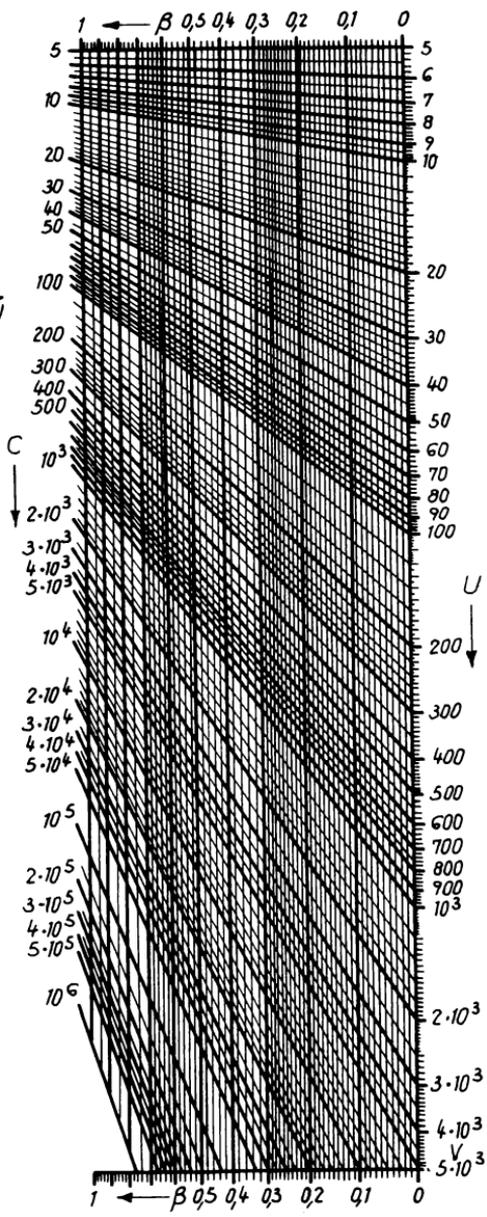
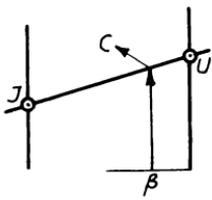


Bild 5.68 Nomogramm zur Ermittlung des *C*-wertes oder des *β*-wertes

Kontrollfragen

1. Was verstehen Sie unter "Schrotrauschen"?
2. Wodurch unterscheiden sich Ladungstransport in Raumladungsfeldern und Ladungstransport in Gasen?
3. Erläutern Sie die Begriffe "Ionisation" und "Rekombination"!
4. Beschreiben Sie die normale Glimmentladung! Wodurch unterscheidet sie sich von der anomalen?
5. Welche prinzipiellen Unterschiede bestehen zwischen Leitern und Halbleitern?
6. Erläutern Sie die Störstellenleitung anhand des Energiebändermodells!
7. Beschreiben Sie die Verhältnisse am stromlosen p-n-Übergang!
8. In welcher Weise ist das Verhalten eines p-n-Überganges von der Temperatur abhängig?
9. Warum rauschen Halbleiter im allgemeinen stärker als Elektronenröhren?
10. Was bezeichnen Sie als "Zuverlässigkeit eines Bauelements"?
11. Von welchen Faktoren ist die Zuverlässigkeit abhängig?
12. Was ist eine redundierte Schaltung?
13. In welchen Fällen ist die Verwendung von Drahtwiderständen gegenüber Schichtwiderständen vorteilhaft? Unter welchen Bedingungen verwendet man zweckmäßigerweise Schichtwiderstände?
14. Was ist beim Einsatz von Kohleschichtwiderständen zu beachten?
15. Erklären Sie den Unterschied zwischen einem linearen und einem nichtlinearen Widerstand!
16. Wie kann man die Dissipationskonstante eines Heißleiters ermitteln?
17. Was ist bei der Parallelschaltung von Heißleitern zu beachten?
18. Vergleichen Sie Vor- und Nachteile der Eisen-Wasserstoff-Widerstände mit denen der keramischen Kaltleiter!

19. Erläutern Sie den Unterschied zwischen statischem und dynamischem Widerstand eines Varistors! In welchem Fall arbeiten Sie mit dem einen, wann mit dem anderen?

Übungsaufgaben

1. Zwei Heißeiter TNM 100 und TNM 220 liegen in Reihe.
Wie groß sind bei 27°C R_{ges} ; b_{ges} ; TK_{ges} ?
Gegeben: TNM 100: Kaltwiderstand bei 20°C 100Ω ,
Energiekonstante $b = 1700^\circ\text{K}$,
TNM 220: Kaltwiderstand bei 20°C 220Ω ,
Energiekonstante $b = 1900^\circ\text{K}$
2. Zu einem Heißeiter TNK 270 - 10 wird ein temperaturunabhängiger linearer Widerstand parallel geschaltet. Wie groß muß der Parallelwiderstand gewählt werden, damit bei 27°C der $TK_{\text{ges}} = -2\%/^\circ\text{C}$ ist?
Gegeben: TNK 270 - 10: Kaltwiderstand 270Ω ,
Energiekonstante $b = 4500^\circ\text{K}$
3. Ein Heißeiter hat bei 20°C einen Widerstand von 500Ω und bei 125°C einen Widerstand von $13,5\Omega$.
Wie groß ist sein Widerstand bei 80°C ?
Wie groß sind seine Temperaturkoeffizienten bei $20, 80, 125^\circ\text{C}$?
4. Ein Drahtwiderstand $R = 1\text{k}\Omega$ hat einen Temperaturkoeffizienten $TK = +1\%/^\circ\text{C}$.
Er soll mit einem Heißeiter in Reihe geschaltet werden, so daß sich bei 30°C gerade ein Gesamtwiderstand von $R_{\text{ges}} = 1,5\text{k}\Omega$ mit $TK_{\text{ges}} = 0$ ergibt.
Wie groß muß b dieses Heißeiters sein?
Wie groß muß sein Kaltwiderstand sein?
5. Der Heißeiter TNA 10/300 hat einen Kaltwiderstand von $R_{20} = 2\text{k}\Omega$. Die Energiekonstante beträgt $b = 4200^\circ\text{K}$.
Wie hoch ist seine Temperatur bei Nennbelastung?

Zu einer bestimmten Zeit werde die Belastung abgeschaltet. Wie groß ist der Widerstand des Heißleiters zur Zeit $t = \tau$ nach dem Abschalten?

6. Gegeben sind zwei Heißleiter mit den Kaltwiderständen $R_{20\ 1} = 2\ k\Omega$ und $R_{20\ 2} = 3\ k\Omega$ sowie den Energiekonstanten $b_1 = 3500\ ^\circ K$ und $b_2 = 4500\ ^\circ K$. Gesucht ist die Temperatur, bei der $R_1 = R_2$ ist.
7. Gefordert wird ein Heißleiter, der bei der Temperatur $20\ ^\circ C$ einen TK von mindestens $3\ \%/grad$. besitzt. Wie groß muß die Energiekonstante b mindestens sein?
8. Ein Heißleiter soll bei einer Temperaturänderung von $30\ ^\circ C$ auf $35\ ^\circ C$ eine Widerstandsänderung von 10% aufweisen. Welchen Wert muß b mindestens haben?
9. Der Heißleiter TNK 270 - 10 liegt in Reihe mit einem temperaturunabhängigen linearen Widerstand von $500\ \Omega$. Wie ändert sich das Spannungsteilerverhältnis, wenn die Temperatur von $20\ ^\circ C$ auf $30\ ^\circ C$ ansteigt?

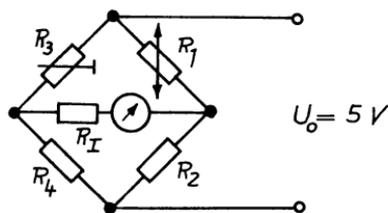
10. Gegeben ist die nebenstehende Brückenschaltung:

$$R_2 = R_4 = 1\ k\Omega$$

$$R_{Instr.} = 2\ k\Omega$$

Heißleiter TNM 220

$$b = 1900\ ^\circ K.$$

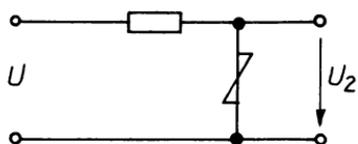


Das Instrument benötigt zum Vollausschlag $10\ mA$; die Skala ist linear in 100 Teilstriche geteilt.

Die Brücke soll bei $50\ ^\circ C$ abgeglichen werden. Welcher Widerstand muß an R_3 eingestellt werden?

Wieviele Skalenteile beträgt der Instrumentenausschlag, wenn nach dem Abgleich die Temperatur auf $53\ ^\circ C$ ansteigt?

11. Gegeben ist eine Stabilisierungsschaltung, wie sie die Skizze zeigt.



$$U = 700 \text{ V} \quad U_2 = 140 \text{ V}$$

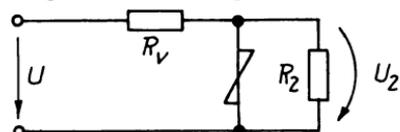
$$\frac{\Delta U}{U} = \pm 20\%$$

$$\beta = 0,2$$

Wie groß ist $\frac{\Delta U_2}{U_2}$?

Welchen Wert müßte β haben, wenn $\frac{\Delta U_2}{U_2} \leq 3,5\%$ gefordert wird?

12. Gegeben ist folgende Stabilisierungsschaltung:



$$U = 320 \text{ V} \quad R_V = 20 \text{ k}\Omega$$

$$U_2 = 80 \text{ V} \quad R_2 = 20 \text{ k}\Omega$$

$$\beta = 0,2$$

Die Schwankungen der Eingangsspannung betragen $\pm 10\%$.
Wie groß sind die relativen und absoluten Schwankungen der Ausgangsspannung?

Lösung der Übungsaufgaben

Aufgabe 1

Aus dem Kaltwiderstand R_{20} muß zunächst die Mengenkonstante α ermittelt werden:

$$\begin{aligned} R_{120} &= \alpha_1 \cdot e^{\frac{b_1}{T_{20}}} & \text{bzw.} & & R_{220} &= \alpha_2 \cdot e^{\frac{b_2}{T_{20}}} \\ \alpha_1 &= R_{120} \cdot e^{-\frac{b_1}{T_{20}}} & & & \alpha_2 &= R_{220} \cdot e^{-\frac{b_2}{T_{20}}} \\ &= R_{120} \cdot e^{-\frac{1700}{293}} & & & &= R_{320} \cdot e^{-\frac{1900}{293}} \\ &= 100 \Omega \cdot e^{-\frac{1700}{293}} & & & &= 220 \Omega \cdot e^{-\frac{1900}{293}} \end{aligned}$$

Zu beachten ist: T ist in Grad Kelvin einzusetzen.

Mit den nunmehr vorliegenden Werten für α lassen sich die Widerstandswerte bei $\vartheta = 27^\circ\text{C} \hat{=} T = 300^\circ\text{K}$ berechnen:

$$\begin{aligned} R_{127} &= \alpha_1 \cdot e^{\frac{b_1}{T_{27}}} & R_{227} &= \alpha_2 \cdot e^{\frac{b_2}{T_{27}}} \\ &= 100 \Omega \cdot e^{-\frac{1700}{293}} \cdot e^{\frac{1700}{300}} & &= 220 \Omega \cdot e^{-\frac{1900}{293}} \cdot e^{\frac{1900}{300}} \\ &= 100 \Omega \cdot e^{-0,525} & &= 220 \Omega \cdot e^{-0,585} \end{aligned}$$

$$R_{127} = \underline{\underline{86 \Omega}}$$

$$R_{227} = 189 \Omega$$

$$R_{\text{ges}} = R_1 + R_2 = \underline{\underline{275 \Omega}}$$

$$b_{\text{ges}} = \frac{1}{R_{\text{ges}}} \cdot (b_1 R_1 + b_2 R_2) = \underline{\underline{1850^\circ\text{K}}}$$

$$TK_{\text{ges}} = -\frac{b_{\text{ges}}}{T^2} = -\frac{1850^\circ\text{K}}{9 \cdot 10^4 \text{ } ^\circ\text{K}^2} = \underline{\underline{-2,05 \frac{\%}{\text{grad}}}}$$

Aufgabe 2

Der TK_{ges} ist abhängig von b_{ges} :

$$TK_{ges} = - \frac{b_{ges}}{T^2}$$

$$b_{ges} = -TK_{ges} \cdot T^2$$

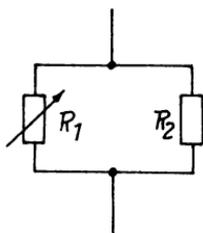
$$b_{ges} = \frac{2\%}{\text{grad } K} \cdot 9 \cdot 10^4 (\text{grad } K)^2$$

$$b_{ges} = 2 \cdot 9 \cdot 10^{-2} \cdot 10^4 \text{ grad } K$$

$$\underline{\underline{b_{ges} = 1800 \text{ } ^\circ K}}$$

Beachten Sie: Der Temperaturkoeffizient ist gemäß seiner Definition auf eine Temperaturänderung bezogen. Es ist gleichgültig, ob man diese Änderung in $^\circ C$ oder in $^\circ K$ angibt.

Für die Parallelschaltung gilt:



$$b_{ges} = R_{ges} \left(\frac{b_1}{R_1} + \frac{b_2}{R_2} \right) \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{=0, \text{ da linearer Wid.}}$$

$$b_{ges} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{b_1}{R_1}$$

$$\frac{R_1 + R_2}{R_2} = \frac{b_1}{b_{ges}}$$

$$1 + \frac{R_1}{R_2} = \frac{b_1}{b_{ges}}$$

$$R_2 = \frac{R_1}{\frac{b_1}{b_{ges}} - 1} = \frac{R_1}{1,5}$$

$$R_{127} = 270 \Omega \cdot e^{\frac{4500}{300}} \cdot e^{-\frac{4500}{293}}$$

$$= 68 \Omega$$

$$R_2 = \frac{68 \Omega}{1,5} = \underline{\underline{45 \Omega}}$$

Aufgabe 3

$$\text{Gegeben: } T_1 = 293 \text{ } ^\circ\text{K} \quad T_2 = 398 \text{ } ^\circ\text{K} \quad T_3 = 353 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$R_1 = 500 \text{ } \Omega \quad R_2 = 13,5 \text{ } \Omega$$

Es gilt:

$$b = \frac{T_2 \cdot T_1}{T_2 - T_1} \cdot \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)$$

$$b = \frac{293 \cdot 398}{105} \cdot \ln\left(\frac{500}{13,5}\right)$$

$$\underline{\underline{b = 4000 \text{ } ^\circ\text{K}}}$$

Berechnung von a:

$$a = R_1 \cdot e^{-\frac{b}{T_1}}$$

$$R_3 = a \cdot e^{\frac{b}{T_3}} = R_1 \cdot e^{-\frac{b}{T_1}} \cdot e^{\frac{b}{T_3}}$$

$$R_3 = R_1 \cdot e^{4000 \cdot \frac{-60}{293 \cdot 353}} = R_1 \cdot e^{-2,32}$$

$$R_3 = 500 \text{ } \Omega \cdot e^{-2,32} = \frac{500 \text{ } \Omega}{e^{2,32}} = \frac{500 \text{ } \Omega}{10,2}$$

$$\underline{\underline{R_3 = 49 \text{ } \Omega}}$$

$$TK_1 = -\frac{b}{T_1^2} = -\frac{4000 \text{ } ^\circ\text{K}}{(293)^2 \text{ } (^\circ\text{K})^2} = \underline{\underline{-4,65 \text{ } \frac{\%}{\text{grad}}}}$$

$$TK_2 = -\frac{b}{T_2^2} = -\frac{4000 \text{ } ^\circ\text{K}}{(398)^2 \text{ } (^\circ\text{K})^2} = \underline{\underline{-2,55 \text{ } \frac{\%}{\text{grad}}}}$$

$$TK_3 = -\frac{b}{T_3^2} = -\frac{4000}{(353)^2 \text{ } (^\circ\text{K})^2} = \underline{\underline{-3,2 \text{ } \frac{\%}{\text{grad}}}}$$

Aufgabe 4

Für den Gesamttemperaturkoeffizienten einer Reihenschaltung gilt:

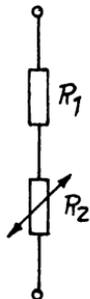
$$TK_{\text{ges}} \cdot R_{\text{ges}} = TK_1 \cdot R_1 + TK_2 \cdot R_2 \quad (\text{Siehe Kapitel 2})$$

"Lineare Widerst.)

Gefordert wird:

$$TK_{\text{ges}} = 0; R_{\text{ges}} = 1,5 \text{ k}\Omega = R_1 + R_2 \rightarrow R_2 \approx 500 \Omega$$

Also ist:



$$0 = TK_1 R_1 + TK_2 R_2$$

$$TK_2 = -TK_1 \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

$$-\frac{b_2}{T^2} = -TK_1 \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

$$b_2 = TK_1 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot T^2 = \frac{0,01}{\text{grad}} \cdot \frac{10^3}{5 \cdot 10^2} \cdot (303)^2 (\text{°K})^2$$

$$\underline{\underline{b_2 = 1840 \text{ °K}}}$$

$$R_{2,30} = 500 \Omega \rightarrow \alpha = R_{2,30} \cdot e^{-\frac{b}{T_{30}}}$$

$$R_{2,20} = \alpha \cdot e^{\frac{b}{T_{20}}} = R_{2,30} \cdot e^{-\frac{b}{T_{30}}} \cdot e^{\frac{b}{T_{20}}}$$

$$R_{2,20} = 500 \Omega \cdot e^{0,218}$$

$$\underline{\underline{R_{2,20} = 622 \Omega}}$$

Aufgabe 5

Aus der Typenbezeichnung TNA 10/300 geht die Nennbelastung hervor:

$$I_N = 300 \text{ mA}; \quad U_N = 10 \text{ V}.$$

Damit liegt R_N fest:

$$R_N = \frac{10 \text{ V}}{300 \text{ mA}} = 33,3 \, \Omega.$$

Gegeben sind weiterhin der Kaltwiderstand und die Energiekonstante, so daß α ausgerechnet werden kann:

$$\alpha = R_{20} \cdot e^{-\frac{4200}{293}}$$

Es gilt:

$$R_N = \alpha \cdot e^{\frac{b}{T_x}} = R_{20} \cdot e^{-\frac{4200}{293}} \cdot e^{\frac{4200}{T_x}}$$

Wenn man diese Gleichung nach T_x umstellt, so erhält man:

$$T_x = \frac{b}{\ln\left(\frac{R_N}{R_{20}}\right) + \frac{4200}{293}} = \underline{\underline{410 \text{ °K}}}$$

$$\underline{\underline{\mathcal{J}_x = 137 \text{ °C}}}$$

Nach Abschalten der Belastung kühlt sich der Widerstand ab. Definitionsgemäß ist die Zeitkonstante τ diejenige Zeit, nach der die Temperatur auf das $\frac{1}{e}$ -fache ihres Anfangswertes gesunken ist.

Bei $t = \tau$:

$$\mathcal{J}' = \mathcal{J}_x \cdot \frac{1}{e} = \frac{137 \text{ °C}}{e} = \underline{\underline{50,3 \text{ °C}}} \\ \hat{=} 323 \text{ °K}$$

$$R' = R_{20} \cdot e^{-\frac{4200}{293}} \cdot e^{\frac{4200}{323}}$$

$$\underline{\underline{R' = 536 \, \Omega}}$$

Aufgabe 6

In bekannter Weise gilt:

$$\alpha_1 = R_{120} \cdot e^{-\frac{b_1}{T_{20}}} \quad \text{und} \quad \alpha_2 = R_{220} \cdot e^{-\frac{b_2}{T_{20}}}.$$

Bei T_x sollen R_1 und R_2 gleich sein:

$$R_{1x} = R_{2x}$$

$$\alpha_1 \cdot e^{\frac{b_1}{T_x}} = \alpha_2 \cdot e^{\frac{b_2}{T_x}}$$

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = e^{\frac{b_2}{T_x}} \cdot e^{-\frac{b_1}{T_x}}$$

$$\frac{R_{120} \cdot e^{-\frac{b_1}{T_{20}}}}{R_{220} \cdot e^{-\frac{b_2}{T_{20}}}} = e^{\frac{1}{T_x}(b_2 - b_1)}$$

$$\ln\left(\frac{R_{120}}{R_{220}}\right) + \frac{1}{T_{20}}(b_2 - b_1) = \frac{1}{T_x}(b_2 - b_1)$$

$$\frac{1}{T_x} = \ln\left(\frac{R_{120}}{R_{220}}\right) \cdot \frac{1}{(b_2 - b_1)} + \frac{1}{T_{20}}$$

$$T_x = \frac{T_{20}(b_2 - b_1)}{T_{20} \cdot \ln\left(\frac{R_{120}}{R_{220}}\right) + (b_2 - b_1)}$$

$$T_x = \frac{293 \cdot (4500 - 3500)}{293 \cdot \ln\left(\frac{2k\Omega}{3k\Omega}\right) + (4500 - 3500)}$$

$$T_x = 880 \text{ °K}$$

$$T_x = 627 \text{ °C}$$

Diese Temperatur ist höher, als im allgemeinen die oberen Maximalwerte liegen. Im technisch realen Fall ist also nicht zu erwarten, daß die beiden Widerstände gleichen Wert annehmen.

Aufgabe 7

$$TK = -\frac{b}{T^2} \qquad TK = -3 \frac{\%}{\text{grad}}$$

$$b = -TK \cdot T^2$$

$$b = \frac{0,03}{\text{grad}} \cdot (293)^2 (\text{grad})^2 = \underline{\underline{2560 \text{ } ^\circ\text{K}}}$$

Aufgabe 8

Relative Widerstandsänderung 10 % bedeutet:

$$\frac{\Delta R}{R_1} = 0,1 \longrightarrow \Delta R = 0,1 \cdot R_1$$

Mit $R_2 = R_1 - \Delta R = 0,9 \cdot R_1$ wird

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{0,9} = 1,111$$

$$b = \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \cdot \left(\frac{T_2 \cdot T_1}{T_2 - T_1}\right)$$

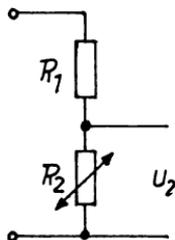
$$\underline{\underline{b = 1950 \text{ } ^\circ\text{K}}}$$

Aufgabe 9

$$R_{20} = 270 \Omega$$

$$R_{30} = R_{20} \cdot e^{-\frac{4500}{293}} \cdot e^{\frac{4500}{303}} = 270 \Omega \cdot e^{-0,5}$$

$$\underline{\underline{R_{30} = 164 \Omega}}$$



$$\text{bei } 20 \text{ } ^\circ\text{C}: \frac{U_2}{U_{\text{ges}}} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2}} = \underline{\underline{0,35}}$$

$$\text{bei } 30 \text{ } ^\circ\text{C}: \frac{U_2}{U_{\text{ges}}} = \frac{R_{230}}{R_{230} + R_1} = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_{230}}} = \underline{\underline{0,248}}$$

Aufgabe 10

Ableich der Drücke ist erreicht, wenn

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

Da $R_2 = R_4 = 1 \text{ k}\Omega$ ist, muß $R_3 = R_1$ gemacht werden.

Zunächst also Berechnung von R_1 bei 50°C :

$$R_{50} = R_{20} \cdot e^{-\frac{b}{293}} \cdot e^{\frac{b}{323}}$$

$$R_{50} = 220 \Omega \cdot e^{-0,602}$$

$$R_{50} = 120 \Omega$$

Der abgleichbare Widerstand R_3 muß auf 120Ω eingestellt werden.

Eine Temperaturerhöhung auf 53°C bringt eine entsprechende Änderung von R_1 , die Brücke wird verstimmt.

Zunächst Berechnung des Widerstandswertes $R_1(53^\circ\text{C})$:

$$R_{53} = R_2 \cdot e^{-\frac{b}{T_{20}}} \cdot e^{\frac{b}{T_{53}}}$$

$$R_{53} = 220 \Omega \cdot e^{-0,656} = \underline{\underline{114 \Omega}}$$

Aus den Grundlagen der E-Technik ist die Gleichung für den Diagonalstrom durch die nicht abgegliche Brücke bereits geläufig:

$$I_0 = U_0 \cdot \frac{(R_1 \cdot R_4 - R_2 \cdot R_3)}{R_I (R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 \cdot R_2 (R_4 + R_3) + R_4 \cdot R_3 (R_1 + R_2)}$$

$$I_0 = 5 \text{ V} \cdot \frac{1,14 \cdot 10^5 - 1,2 \cdot 10^5}{2 \cdot 10^3 (1,114 \cdot 10^3)(1,12 \cdot 10^3) + 1,14 \cdot 10^5 \cdot 1,12 \cdot 10^3 + 1,2 \cdot 1,114 \cdot 10^9}$$

$$\underline{\underline{I_0 = 1,09 \text{ mA}}}$$

Der Instrumentenausschlag beträgt folglich 10,9 Teilstriche.

Aufgabe 11

Es ist die Beziehung anzuwenden:

$$s = \frac{1}{\beta} - \frac{1-\beta}{\beta} \cdot x .$$

Mit den genannten Werten wird

$$S = 5 - \frac{0,8}{0,2} \cdot \frac{140}{700} = 4,2 .$$

Aus der Definitionsgleichung des Stabilisierungsfaktors folgt:

$$\frac{\Delta U}{U} = S \cdot \frac{\Delta U_2}{U_2}$$

$$\frac{\Delta U_2}{U_2} = \frac{1}{S} \cdot \frac{\Delta U}{U} = \frac{1}{4,2} \cdot 0,2 \hat{=} 4,76 \%$$

Die Forderung $\frac{\Delta U_2}{U_2} \leq 3,5 \%$ ist zu kontrollieren.

Für diesen Fall müsste $S = \frac{20}{3,5} = 5,72$ werden.

Das dazu nötige β ergibt sich wie folgt:

$$S = \frac{1}{\beta} - \frac{1-\beta}{\beta} \cdot x = \frac{1-x(1-\beta)}{\beta}$$

$$S \cdot \beta = 1 - x(1-\beta)$$

$$\beta = \frac{1-x}{S-x} = \underline{\underline{0,145}}$$

Diese Forderung kann also mit den gegenwärtig erhältlichen Varistoren nicht erfüllt werden.

Aufgabe 12

Der Gesamtstrom I_{ges} ist gegeben durch zwei Bedingungen:

$$I_{ges} = \frac{(320 - 80) V}{20 \text{ k}\Omega} = 12 \text{ mA}$$

$$I_{ges} = I_1 + I_2 \longrightarrow I_1 = I_{ges} - I_2.$$

Für I_2 erhält man:

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{80 V}{20 \text{ k}\Omega} = 4 \text{ mA}.$$

Somit ist

$$I_1 = 12 - 4 = \underline{\underline{8 \text{ mA}}}.$$

Es wird y mithin:

$$y = \frac{I_2}{I_1} = \frac{4}{8} = 0,5$$

$$x = \frac{80 V}{320 V} = 0,25.$$

Der Stabilisierungsfaktor ist gegeben durch

$$S = \frac{1}{\beta} - \frac{1-\beta}{\beta} \cdot \frac{x+y}{1+y}$$

$$S = \frac{1}{0,2} - \frac{1-0,2}{0,2} \cdot \frac{0,75}{1,5} = 3,0.$$

Aus $S = \frac{\Delta U' \cdot U_2}{U \cdot \Delta U_2}$ folgt:

$$\frac{\Delta U_2}{U_2} = \frac{\Delta U}{U} \cdot \frac{1}{S} = \frac{0,1}{3} \hat{=} \underline{\underline{3,33 \%}}$$

$$\Delta U_2 = 0,033 \cdot U_2 = \underline{\underline{2,64 V}}.$$

Literaturverzeichnis:

- /1/ Sommer, J.: Erfahrungen mit Heiß- und Kaltleitern in der Meßtechnik.
NTF 20 (1961) S. 15
- /2/ Sommer, J.: Neue technische Kaltleiter.
Funk und Ton (1952) 10, S. 520
- /3/ Funkschau (1965) 1, S. 23
- /4/ Heywang, W.: Über anomale Halbleitereffekte an BaTiO_3
Solid State Phys. Electron.Telecom. 3 (1960) S. 877
- /5/ Heywang, W.: Bariumtitanat als Sperrschicht Halbleiter
Solid State Electron 4 (1961) S. 51
- /6/ Heywang, W.: Der Verlauf des komplexen Widerstandes von BaTiO_3 -Halbleitern als Bestätigung des Sperrschichtmodells.
Z. angew. Phys. 16 (1963) 1,
- /7/ Brauer, H.; Fenner, E.: Kaltleiter - ein Element mit positivem Temperaturkoeffizienten.
Siemens-Zeitschrift (1964) 5, S. 369
- /8/ Andrich, E., van der Starke, T.: Aufbau und Eigenschaften von PTC-Widerständen.
Elektronische Rundschau (1963) 2, S. 63
- /9/ Schuldt, W.: Stabilisierung der Röhrenheizung mit Eisen-Wasserstoff-Widerständen.
Radio und Fernsehen 10 (1961) S. 148
- /10/ Freitag, K.: Passive Bauelemente der Schwachstromtechnik. Lehrbriefreihe der **TU** Dresden
VEB Verlag Technik 1966
- /11/ Franke: Eigenschaften und Anwendung von Varistoren.
Radio und Fernsehen 8 (1959) S. 113
- /12/ Katalog VEB Keramische Werke Hermsdorf
Ausgabe 1965
- /13/ Hermsdorfer Technische Mitteilungen 1966 / 17
Halbleiterinformation XII

Als Manuskript gedruckt
Alle Rechte vorbehalten

Ag 613/68/73/1100 (116)

1. Ausgabe

2. Auflage

Druck:

**ZENTRALSTELLE FÜR LEHR- UND ORGANISATIONSMITTEL DES
MINISTERIUMS FÜR HOCH- UND FACHSCHULWESEN, ZWICKAU**

Katalog-Nr.: 200.40-03

Vorzugschutzgebühr: 2,50 M