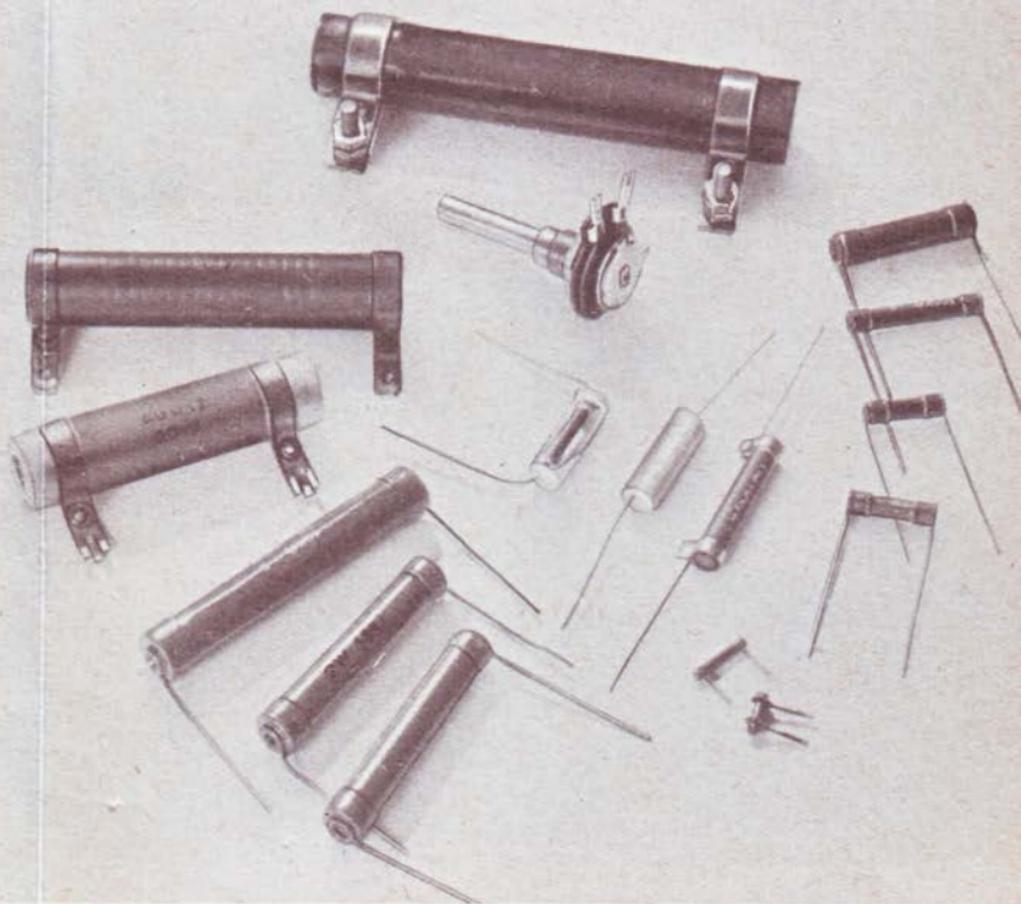


radio
PRAKTIKER
bücherei

DIPL.-ING. GEORG HOFFMEISTER

Widerstandskunde
für Radio-Praktiker



16

FRANZIS-VERLAG · MÜNCHEN



radio PRAKTIKER bücherei

Leicht verständlich, aber technisch zuverlässig, inhaltreich und doch billig sind alle Bände dieser radio- und fernsehtechnischen Bücherei. Namhafte Autoren sind ihre Mitarbeiter, die sich diesem neuen Vorhaben in der richtigen Erkenntnis zur Verfügung stellten, daß es heute mehr denn je darauf ankommt, jedem einzelnen

Interessenten, vor allem auch dem Lernenden, dem Schüler, Studenten und Lehrling, den Aufbau einer kleinen radio-technischen Bibliothek zu ermöglichen. Deshalb wurden Umfang, Ausstattung und Preis so aufeinander abgestimmt, daß für den aufzuwendenden niedrigen Betrag ein Optimum an Wissensstoff und Unterlagen geboten werden kann.

Ausführliches Verzeichnis am Schluß des Heftes oder gratis durch den Buchhandel

Jede Nr. 64 Seiten
mit vielen Bildern

D I E N E U E S T E N B Ä N D E

- | | |
|---|----------------|
| Moderne Schallplattentechnik.
Von Dr.-Ing. Fritz Bergtold. Mit 244 Bildern. | Nr. 63/65
* |
| Sender-Baubuch für Kurzwellen-Amateure, II. Teil.
Von Ing. H. F. Steinhäuser. Mit 52 Bildern. | Nr. 66/67 |
| Formelsammlung für den Radio-Praktiker.
Von Dipl.-Ing. G. G. Rose. Mit 170 Bildern. | Nr. 68/70
* |
| Bastelpraxis, Band I. Allgemeine Arbeitspraxis.
Von Werner W. Diefenbach. Mit 50 Bildern. | Nr. 71
* |
| Drahtlose Fernsteuerung von Flugmodellen.
Von Karl Schultheiss. Mit vielen Bildern. | Nr. 72/73 |
| Einkreis-Empfänger.
Von H. Sutaner. Mit 65 Bildern. | Nr. 74 |
| So gleicht der Praktiker ab.
Von Ing. Otto Limann. Mit 45 Bildern. 2. u. 3. Aufl. | Nr. 75 |
| Bastelpraxis, Band II. Theoretische u. prakt. Grundlagen.
Von Werner W. Diefenbach. Mit 78 Bildern. | Nr. 76
* |
| Der Selbstbau von Meßgeräten für die Funkwerkstatt.
Von Ernst Nieder. Mit 29 Bildern. | Nr. 77 |
| Schwebungssummer.
Von Herbert Lennartz. Mit 42 Bildern. | Nr. 78 |
| Bastelpraxis, Band III.
Von Werner W. Diefenbach. Mit Bildern. | Nr. 79
* |

* Auch in Ganzleinen erhältlich.

Widerstandskunde für Radio-Praktiker

Die konstanten Festwiderstände in Berechnung
und Anwendung

Von

DIPL.-ING. GEORG HOFFMEISTER

*Mit 9 Bildern, 4 Nomogrammen
und 6 großen Zahlentafeln*

3. Auflage



FRANZIS-VERLAG MÜNCHEN

Verlag der G. Franz'schen Buchdruckerei G. Emil Mayer

Das Titelbild zeigt Festwiderstände verschiedenster Größe
Aufnahme: C. Stumpf

1955

Druck: G. Franz'sche Buchdruckerei G. Emil Mayer, München 2, Luisenstraße 17

Vorwort

Der Widerstand zählt in der Radiotechnik zu den wichtigsten Schaltelementen. Das vorliegende Bändchen der Radio-Praktiker-Bücherei hat es sich daher zur Aufgabe gemacht, den Funkpraktiker über Art und Eigenschaften der Widerstände zu unterrichten, ihn weiterhin bei der Berechnung und Anfertigung und beim praktischen Einsatz von Widerständen zu beraten und ihm hierfür das erforderliche Zahlenmaterial zur Verfügung zu stellen.

Neben den allgemeinen Grundlagen und dem Einfluß der Wärme auf den Widerstand, dessen Verständnis für die Belastbarkeit und Genauigkeit der Widerstände von Bedeutung ist, wurden Aufbau, Eigenschaften und Einsatz drahtgewickelter und Schichtwiderstände eingehend behandelt, wobei insbesondere auch auf das Verhalten des Hochohmwiderstandes im Hochfrequenzkreis ausführlich eingegangen wurde. Angefügt wurden weiterhin Abschnitte über die wichtigsten Schaltungsarten und die Kennzeichnung von Widerständen im Nachrichtengerätebau.

Zum leichteren Verständnis und zur praktischen Auswertung des gebotenen Stoffes enthalten die einzelnen Abschnitte zahlreiche Rechenbeispiele. Soweit DIN-Vorschriften zu berücksichtigen waren, sind sie in den Text hinein verarbeitet worden. Schließlich bieten Tafeln mit Materialwerten, Rechen-tafeln und Nomogramme dem Funkpraktiker die notwendigen Rechenunterlagen und die stets willkommene Rechenhilfe.

Wenn dieses Büchlein dazu beiträgt, das Verständnis für die Widerstandstechnik zu fördern mit dem Ziel, für jeden Zweck den richtigen Widerstand zu finden, so hat es seine Aufgabe erfüllt.

Georg Hoffmeister.

Inhalt

Seite

Vorwort	5
1. Grundlagen	5
2. Der Einfluß der Wärme.....	15
3. Drahtgewickelte Widerstände.....	24
4. Induktions- und kapazitätsarme Wicklungsarten von Drahtwiderständen	55
5. Schichtwiderstände	56
6. Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen und die Spannungsteilung	42
7. Der Hochohmwiderstand im Hochfrequenzkreis.....	47
8. Das Eigengeräusch der Widerstände	54
9. Genauigkeit von Meßwiderständen	57
10. Kennzeichnung der Widerstände für die Nachrichten- technik	57

Als Dimension für den Temperaturbeiwert ist an Stelle von $\Omega/^{\circ}\text{C}$ heute allgemein und richtiger $1/^{\circ}\text{C}$ in Anwendung.

Ein Verzeichnis der Tabellen und Nomogramme befindet sich auf Seite 62 am Schluß des Buches

1. Grundlagen

Die *Einheit des elektrischen Leitungswiderstandes* R ist das Ohm (Ω). Sie wird dargestellt durch den Widerstand einer Quecksilbersäule von 1 mm^2 Querschnitt und $106,5 \text{ cm}$ Länge bei 0° C und wird mit „internationalem Ohm“ (int. Ohm) bezeichnet. Wie in den USA. bereits seit 1. Januar 1948 durchgeführt, sind auch in anderen Ländern Bestrebungen im Gange, das System der internationalen elektrischen Einheiten durch das System der absoluten elektromagnetischen Einheiten und damit auch das int. Ohm durch das absolute Ohm (abs. Ohm) zu ersetzen.

Der 10^9 fache Wert der *absoluten elektromagnetischen Einheit* des Leitungswiderstandes ist etwas größer als 1 int. Ohm und es gilt für die zahlenmäßige Beziehung zwischen beiden

$$1 \text{ int. Ohm} = 1,000\,495 \text{ abs. Ohm und}$$

$$1 \text{ abs. Ohm} = 0,999\,505 \text{ int. Ohm.}$$

Die nach dem abs. Ohm hergestellten Widerstände werden also um etwa $0,05\%$ größer als die nach dem int. Ohm ausgeführten.

Als Vielfache des Ohms sind in Anwendung

$$1 \text{ Kiloohm (k}\Omega) = 1\,000 \text{ Ohm} = 10^3 \text{ Ohm}$$

$$1 \text{ Megohm (M}\Omega) = 1\,000\,000 \text{ Ohm} = 10^6 \text{ Ohm}$$

Der Widerstand eines Körpers nimmt mit wachsender Länge l zu und mit wachsendem Querschnitt q ab. Infolgedessen errechnet sich der Leitungswiderstand in Verbindung mit dem Ohmschen Gesetz aus

$$R = \frac{\text{Spannung } U \text{ (in V, mV)}}{\text{Stromstärke } I \text{ (in A, mA)}} = \frac{l \cdot \varrho}{q} \text{ in Ohm} \quad (1)$$

Für das Ohmsche Gesetz merke $\frac{U}{R \cdot I}$ „URI“! (Gesuchte Größe abdecken, ergibt die Gleichung für die beiden anderen Größen).

ϱ ist in Gleichung (1) der spezifische Widerstand des Widerstandsmaterials, d. i. sein Widerstand bezogen auf die Einheit von q und l . Für Widerstandskörper mit großer Längenaus-

dehnung und geringem Querschnitt (Drahtwiderstände) wird ρ bezogen auf $q = 1 \text{ mm}^2$ und $l = 1 \text{ m}$ und erhält somit die Dimension $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$. Bei Körpern mit geringer Längenausdehnung (z. B. Isolierstoffen) wird ρ auch bezogen auf $q = 1 \text{ cm}^2$ und $l = 1 \text{ cm}$, so daß die Dimension für ρ in diesem Falle $\Omega\text{cm}^2/\text{cm} = \Omega\text{cm}$ (Ohmzentimeter) wird. Ihre gegenseitige zahlenmäßige Beziehung ist

$$1 \Omega\text{cm} = 10^{-4} \Omega\text{mm}^2/\text{m}.$$

Als Teile und Vielfache des Ωcm sind noch im Gebrauch

das Mikroohmzentimeter ($\mu\Omega\text{cm}$) = $10^{-6} \Omega\text{cm}$ und
das Megohmzentimeter ($M\Omega\text{cm}$) = $10^6 \Omega\text{cm}$.

Mit Gleichung (1) läßt sich ρ auch ausdrücken durch

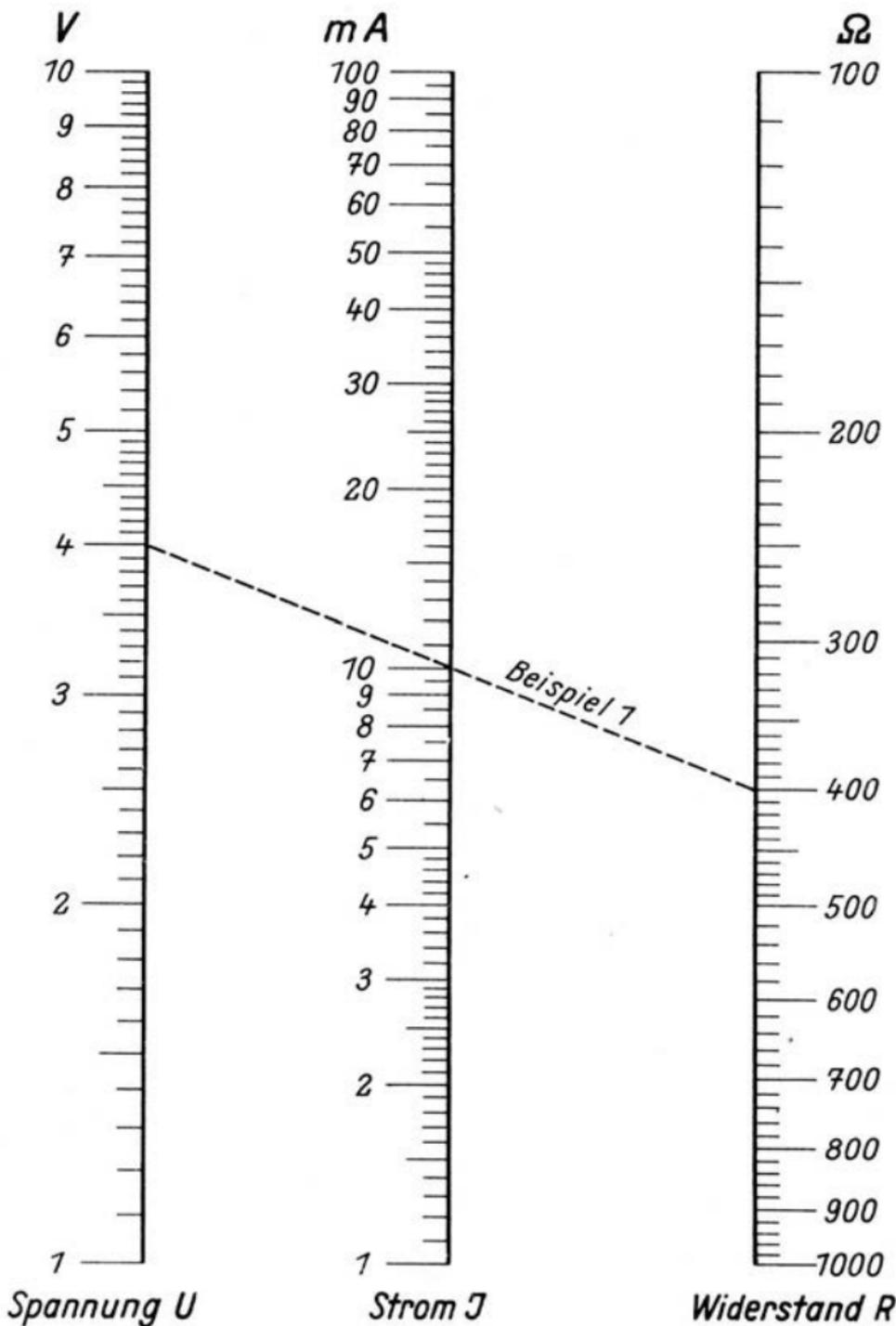
$$\rho = R \cdot \frac{q}{l} = \frac{U \cdot q}{I \cdot l} = \frac{U/l}{I/q} = \frac{E}{i} \quad (2)$$

Werden hierin q und l in cm eingesetzt; so ist U/l der Spannungsabfall auf den cm , also die elektrische Feldstärke E , und I/q die Stromstärke pro cm^2 , also die Stromdichte i .

Der Leitwert G ist der dem Widerstand R reziproke Wert, $G = 1/R$, und wird in Siemens (S) gemessen, wobei $1 S = 1/\Omega$. Die amerikanische Einheit für G ist 1 mho . Entsprechend bezeichnet man den reziproken Wert von ρ , also $1/\rho$, mit Leitfähigkeit oder spezifischem Leitwert κ . Nach den obigen Ausführungen hat κ entweder die Dimension $\text{m}/\Omega\text{mm}^2 = \text{Sm}/\text{mm}^2$ oder $1/\Omega\text{cm} = S/\text{cm}$. Die erstere läßt erkennen, wieviel m eines bestimmten Stoffes von 1 mm^2 Querschnitt den Widerstand 1 Ohm ergeben (z. B. für Aluminium ist $\kappa = 35$ und damit diese Länge 35 m). Wird in Gleichung (1) an Stelle von ρ der spezifische Leitwert κ gesetzt, so erhält sie folgende Form

$$R = \frac{l}{\kappa \cdot q} \quad (3)$$

Der ohmsche Widerstand R läßt sich aus Spannung U und Stromstärke I mit Hilfe des *Nomogrammes 1* ermitteln.



Nomogramm 1. Das Ohmsche Gesetz
Erläuterung siehe Seite 10

**Tafel 1. Spezifischer Widerstand, Leitfähigkeit
und Temperaturkoeffizient der reinen Metalle**
Bezugstemperatur 18° C

Metall	Spez. Widerstd. ρ $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	Leitfähigkeit $\kappa = 1/\rho$ Sm/mm^2	Temper. Koeff. $\alpha \times 10^{-3}$ $\Omega/^\circ\text{C}$
Aluminium	0,0286	35,0	+ 4,1
Antimon	0,385	2,6	+ 5,4
Arsen	0,345	2,9	+ 3,9
Blei	0,208	4,8	+ 4,2
Cadmium	0,076	13,2	+ 4,2
Cäsium	0,21	4,75	+ 4,4
Calcium	0,046	21,8	+ 3,3
Cer	0,77	1,3	—
Chrom	0,0257	39,0	—
Eisen (Elektrolyt)	0,1	10,0	+ 6,6
Gallium	0,5	2,0	+ 4,0
Gold	0,022	45,4	+ 4,0
Indium	0,0835	12,0	+ 4,3
Iridium	0,053	19,0	+ 4,1
Kalium	0,071	14,1	+ 5,8
Kobalt	0,096	10,4	+ 6,6
Kupfer	0,0173	57,8	+ 4,3
Lantham	0,588	1,7	—
Lithium	0,085	11,8	+ 4,4
Magnesium	0,0425	23,5	+ 4,1
Manqan	0,044	22,8	—
Molybdän	0,0427	23,4	+ 4,7
Natrium	0,046	21,7	+ 5,5
Nickel	0,1175	8,5	+ 6,7
Osmium	0,095	10,5	+ 4,2
Palladium	0,102	9,8	+ 3,7
Platin	0,105	9,5	+ 3,9
Quecksilber 0° C	0,94	1,063	+ 0,988
Rhenium	0,21	4,77	—
Rhodium	0,06	16,6	+ 4,4
Rubidium	0,123	8,1	+ 5,2
Ruthenium	0,145	6,9	—
Silber	0,016	62,5	+ 4,1
Strontium	0,303	3,3	+ 3,8
Tantal	0,147	6,8	+ 3,5
Thallium	0,175	5,7	+ 4,8
Wismut	1,17	0,855	+ 4,5
Wolfram	0,053	18,9	+ 4,8
Zink	0,059	17,0	+ 4,2
Zinn	0,110	9,1	+ 4,6

**Tafel 2. Spezifischer Widerstand, Leitfähigkeit
und Temperaturkoeffizient der wichtigsten Metallegierungen
Bezugstemperatur 20° C**

Metall	Spez. Widerst. ρ $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	Leitfähigkeit $\kappa = 1/\rho$ Sm/mm^2	Temper. Koeff. $\alpha \times 10^{-3}$ $\Omega/0^\circ\text{C}$
a) Kupfer für Elektrotechnik n. DIN 57 201 (Elektrolytkupfer n. DIN 1708)			
weich geglähter Draht	max. 0,01754	57	+ 0,068
kalt gereckter Draht			
Festigkeit > 30 kg/mm ²			
$\varnothing \geq 1 \text{ mm}$	0,01786	56	
$\varnothing < 1 \text{ mm}$	0,01818	55	
weich geglähter verzinnter Draht			
$\varnothing \geq 0,3 \text{ mm}$	0,01770	56,5	
$\varnothing < 0,3 \dots 0,1 \text{ mm}$	0,01802	55,5	
$\varnothing < 0,1 \text{ mm}$	0,01852	54	
b) Kupferlegierungen			
Kupfer mit 0,04 % P	0,023	43,5	+ 0,8
Kupferbronze mit 1,5 % Sn	0,05	20,0	
Phosphorbronze mit 7 % P	0,18	5,6	
Tombak mit 75 % Cu u. 25 % Sn	0,058	17,2	+ 1,6
Messing	0,06...0,075	16,7...18,3	+ 1,6
Aluminiumbronze mit 85 % Cu u. 5,5 % Al.	0,10	10,0	
c) Aluminium für Elektrotechnik n. DIN 57 202 (Reinaluminium n. DIN 1712) u. DIN 57 202 U			
weichgeglüht, Reingehalt 99,5 %	max. 0,02778	36	+ 0,11
weichgeglüht, Reingehalt 99,3 %	0,02825	35,4	
d) Aluminium-Legierungen			
Duraluminium m. 4 % Cu u. 1 % Mn	0,05	20,0	—
Hydronalium m. 10 % Mn	0,06	16,6	—
Lautal m. 5 % Cu	0,044	22,8	+ 2,0
Silumin m. 12 % Si	0,039	26,0	+ 4,0
e) Zink für Elektrotechnik n. DIN 57 204			
Zinklegierung Zn-Fe	max. 0,0667	15	+ 3,6
f) Leiter aus weichem Stahl in der Elektrotechnik n. DIN 57 205			
weichgeglüht, Zugfestigkeit $\leq 45 \text{ kg}/\text{mm}^2$	max. 0,149	6,7	+ 4,5
h) Eisen und Stahl			
Eisendraht (Telegraphendraht)	0,138	7,25	+ 4,5
Eisen	0,08...0,15	12,5...6,6	+ 4,5
Stahl, weich	0,1 ...0,2	10,0...5,0	+ 4,5...+ 5,0
Stahl, gehärtet	0,4 ...0,5	2,5...2,0	+ 4,5...+ 5,0

Tafel 3a. Eigenschaften metallischer

Werkstoff	Chemische Zusammen- setzung	Spez. Wider- stand bei 20° C ρ	Spez. Leit- wert bei 20° C $\kappa = 1/\rho$	Widerstands- temperaturkoeff. $\alpha \times 10^{-3}$	
				in der Umge- bung der Raum- temper. $\Omega/^{\circ}C$	zwischen 20° u. 100° C $\Omega/^{\circ}C$
1	2	3	4	5	6
1 Neusilber Hawe 30 Nickelin-Neu- silber, Ni III Nickelin Ni I	60% Cu 17% Ni 23% Zn	0,3	3,33	—	0,35
	58% Cu 22% Ni 20% Zn	0,36	2,78	—	0,31
	54% Cu 26% Ni 20% Zn	0,43	2,32	—	0,23
2 Konstantan I a I a Nickelin (zink- u. eisenfrei)	54% Cu 45% Ni 1% Mn	0,5	2,0	—	0,03
	67% Cu 30...31% Ni 2...3% Mn	0,4	2,5	—	0,11
3 Manganin Isabellin Novokonstant A-Legierung (Therlo)	86% Cu 12% Mn 2% Ni	0,43	2,32	0,02	—
	84% Cu 13% Mn 3% Al	0,5	2,0	-0,02	—
	82,5% Cu 12% Mn 4% Al	0,45	2,22	-0,04	—
	1,5% Fe 85% Cu 9,5% Mn 5,5% Al	0,45	2,22	0,02 (0,001)	—

Erläuterung zu Nomogramm 1 (Seite 7)

Beispiel 1: Gegeben: $U = 4 \text{ V}$ und $I = 10 \text{ mA}$, gesucht: R .

Die Verbindungslinie $4 \text{ V} \dots 10 \text{ mA}$ schneidet die Widerstandsleiter bei 400 Ohm . Umgekehrt läßt sich natürlich auch eine der beiden anderen Größen U bzw. I ermitteln, wenn die beiden übrigen (I und R bzw. U und R) bekannt sind. Für die Erweiterung des Ablesebereiches ist zu beachten, daß eine

Widerstandswerkstoffe: Kupfer-Legierungen

Wärmeleitfähigkeit		Spezifische Wärme	Thermokraft gegen Kupfer	Dichte	Schmelzpunkt	Zerreiße- festig- keit	Bruch- dehnung	Linearer Ausdehn- ungs- koeffiz. zwischen 20° u. 100° C × 10 ⁻⁶	Höchste zuläs- sige Ge- brauchs- tempe- ratur	
bei 20° C	zwischen 20° u. 100° C									cal/cm, s, ° C
7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
0,6	—	0,095	— 15	8,6	≈ 1000	40	35	18	—	
—	—	0,097	—	8,7	1125	weich: 51 hart: 83	weich: 34 hart: 1	16,8	—	
—	—	0,094	—	8,7	1145	weich: 60 hart: 85	weich: 30 hart: 1,5	16	—	
0,048	—	0,098	— 40	8,9	1275	weich: 50 hart: 75	weich: 30 hart: 3	14	400	
—	—	0,095	—	8,9	1230	weich: 44	33...15	16	300	
—	—	—	+ 1,0	8,4	960	50...55	25	18,1	300	
—	—	—	— 0,2	8,0	—	50...55	25	16	400	
—	—	—	— 0,3	—	970	50...55	15...25	18	400	
—	—	—	— 0,3	—	—	50...55	15...25	—	—	

Veränderung des Maßstabes auf der Spannungsleiter eine gleichsinnige Änderung des Maßstabes auf der Widerstandsleiter bedingt (z. B. 40V...10 mA ergeben 4000 Ohm), während eine Veränderung des Maßstabes auf der Stromleiter eine gegensinnige Änderung des Maßstabes auf der Widerstandsleiter erforderlich macht (z. B. 4 V...100 mA ergeben 40 Ohm).

Tafel 3b. Eigenschaften metallischer

Werkstoff	Chemische Zusammensetzung	Kaltverformter ungeglühter Zustand						
		Spez. Widerstand bei 20°C ϱ	Spez. Leitwert bei 20°C $\kappa = 1/\varrho$	Widerstandskoeffiz. in der Umgebung d. Raumtemp. $\alpha \times 10^{-3}$	Thermo-EMK gegen Kupfer	Dichte	Zerreißfestigkeit	Bruchdehnung
		$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	Sm/mm^2	$\Omega/^\circ\text{C}$	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	g/cm^3	kg/mm^2	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9
NBW 108	82%Ag 10%Mn 8%Sn	0,55	1,82	-0,040	+ 0,5	9,58	61	2
NBW 139	78%Ag 13%Mn 9%Sn	0,61	1,64	-0,080	- 0,1	9,45	45	1
NBW 173	85%Ag 17%Mn 3%Sn	0,58	1,73	-0,105	+ 2	9,12	47	1
NBW 87	85%Ag 8%Mn 7%Sn	0,435	2,3	+0,010	- 0,4	9,70	29	22
Zinnfreie Legierung	91,22%Ag 8,78%Mn	0,32	3,12	-0,04	+ 2,5	9,51	45	2

Werte für ϱ und κ sind enthalten in Tafel 1 für reine Metalle, in Tafel 2 für die wichtigsten Metallegierungen, in den Tafeln 3 a bis 3 c (Spalte 3 und 4) für metallische Widerstandswerkstoffe und in Tafel 3 d für ältere metallische Widerstandswerkstoffe und Halbleitermaterialien.

Beispiel 2: Wie groß ist der Widerstandswert eines kalt gereckten Kupferdrahtes von 1,5 mm² Querschnitt und 50 m Länge?

Nach Tafel 2 ist $\varrho = 0,01786 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ und $\kappa = 56 \text{ Sm}/\text{mm}^2$ und damit der gesuchte Widerstand nach Gleichung (1) oder (3)

$$R = \frac{l \cdot \varrho}{q} = \frac{50 \cdot 0,01786}{1,5} = \frac{l}{\kappa \cdot q} = \frac{50}{56 \cdot 1,5} = 0,59 \text{ Ohm.}$$

Widerstandswerkstoffe: Silber-Legierungen

getemperter Zustand

Temperatur	Temperaturzeit	Spez. Widerstand bei 20°C ρ	Spez. Leitwert bei 20°C $\kappa = 1/\rho$	Widerstandstemp. Koeffizient in der Umgebung der Raumtemperatur. $1/\theta \text{ } ^\circ\text{C}$		Linear. Temperaturbereich	Thermo EMK gegen Kupfer	Zerreißfestigkeit	Bruchdehnung
$^\circ\text{C}$	std	$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	Sm/mm^2	$\alpha \times 10^{-6}$	$\beta \times 10^{-6}$	$^\circ\text{C}$	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	kg/mm^2	$\%$
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
175 (430)	10	0,51	1,96	+ 1,70	+ 0,23	gering	+ 0,5	39	12
195	10	0,57	1,76	- 0,47	+ 0,21	150	- 0,2	52	1
270 (400)	3 × 6	0,46	2,17	- 0,49	+ 0,05	200	+ 2	57	1
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
250	10	—	—	—	—	—	—	—	—
215	oder 40	0,28	3,57	- 0,85	+ 0,042	150	+ 2,5	45	2

2. Der Einfluß der Wärme

Jeder vom Strom durchflossene Leiter erwärmt sich. Die in einem Widerstand von der Größe R in τ Sekunden durch den Strom I entstehende Wärmemenge ist nach dem Jouleschen Gesetz

$$Q = 0,239 \cdot I^2 \cdot R \cdot \tau \text{ in cal}$$

Hierin dient der Faktor 0,239 lediglich zur Umrechnung von elektrischer Energie (W) auf Wärmeenergie (cal). Weiterhin bedeuten:

$I^2 \cdot R \cdot \tau$ = elektrische Arbeit in Wattsekunden (Ws) oder Joule (J),

$I^2 \cdot R = N$ = elektrische Stromwrmeleistung in Watt (W), d. i. die in 1 Sekunde geleistete Arbeit.

Tafel 3c. Eigenschaften metallischer Widerstandswerkstoffe:

Werkstoff		Chemische Zusammensetzung	Spezif. Widerstand bei 20° C ϑ	Spezif. Leitwert bei 20° C κ = 1/ϑ
1		2	3	4
1	1. Eisenfreie Chrom-Nickel-Leg. (NC) 2. Eisenhaltige Chrom-Nickel-Leg. 3. Chrom-Eisen-Silizium-Leg. (FC) 4. Chrom-Eisen-Aluminium-Leg. (FCA)	20 % Cr 77...80 % Ni 0... 2 % Mn	1,05... 1,10	0,95... 0,91
2	Ferrochronin; Hawe 110	62 % Ni 15 % Cr 23 % Fe	1,10	0,91
	Cr Ni Fe II; Cekas	63 % Ni; 15 % Cr; 20 % Fe; 2 % Mn	1,12	0,89
	Cr Ni Fe I; CNF 65; NCT 6; Thermochrom	70 % Ni; 20 % Cr 8 % Fe; 2 % Mn	1,11	0,90
	B 7 M (Contracid)	60 % Ni; 15 % Cr; 15 % Fe 7 % Mo, 2 % Mn, 1 % Si	1,16	0,86
	CNE-Leg; NCT 3; Pyrotherm; Cekas 0; Cekas I; Cr Ni „F“	20 % Ni, 25 % Cr 55 % Fe	0,97	1,03
Cr Ni Fe III	20 % Ni, 20 % Cr, 48,5 % Fe 2 % Mn, 0,5 % Si	1,03	0,97	
3	20 % Chrom	17...20 % Cr 0,5...2 % Si 0,5 % Mn, Rest Fe	0,75	1,33
	30 % Chrom	28...32 % Cr, 0,5...1,5 % Si 0,5 % Mn, Rest Fe	0,81	1,23
4	Megapyr I	65 % Fe 38 % Cr 5 % Al	1,4	0,715
	Cekas-Extra; CAF-Leg; Permatherm; Alsidchrom	75 % Fe 20 % Cr 5 % Al	1,4	0,715
	Kanthal A 1	72 % Fe, 80 % Cr 5 % Al, 3 % Co	1,45	0,69
	Sichromal 12; Megapyr II	76 % Fe 20 % Cr	1,17	0,855
	CRA-Leg	3,5 % Al 86 % Fe	1,1	0,91
	Sichromal 10; Megapyr III	12 % Cr 2 % Al	0,88	1,135

Chrom-Nickel- und Chrom-Eisen-Legierungen

Widerstands- temp.- Koeff. zwischen 20° u. 100° C $\alpha \times 10^{-3}$ $\Omega/^\circ C$	Wärme- leit- fähig- keit cal/cm, s, °C	Linearen Ausdeh- nungs- koeff. $\times 10^{-6}$ mm/m °C	Spezif. Wärme cal/g, °C	Thermo- EMK gegen Kupfer $\mu V/^\circ C$	Dichte g/cm ³	Schmelzpunkt °C	Zerrei- festiq- keit kg/mm ²	Bruch- deh- nung %	Höchste zuläs- sige Ge- brauchs- temp, °C
5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0,14	0,04	14	0,105	+ 14	8,4	1400	70...75	30	1100... 1150
0,15	0,03	13	0,11	—	8,15	1390	70...75	30	1050... 1100
0,13	0,03	13	0,11	—	8,25	1390	70...75	30	1050... 1100
0,10	0,03	14	0,11	—	8,27	1395	65...70	30	1050... 1100
0,09	0,03	13	0,11	—	8,35	1365	80	27	1050
0,44	0,03	14,5	0,12	—	7,8	≈ 1375	60	45	1000
0,35	—	—	—	—	7,9	1400	—	—	1000
1	0,05	11	0,11	—	7,6	1425	60...70	15	900
1	0,05	10	0,11	—	7,6	1470	60...70	15	1000
0,025	0,03	15,5	0,12	—	7,1	1500	80	15	1300... 1350
0,04	0,03	15	0,12	—	7,1	1500	70	18	1300
0,06	0,03	17	0,12	—	7,1	1500	80	14	1300
0,04	0,04	15	0,12	—	7,4	1475	65	14	1200
0,07	0,045	13	0,12	—	7,4	1450	65	14	1000

Tafel 3d. Spezifischer Widerstand, spezifischer Leitwert und Temperaturkoeffizient der älteren Widerstandslegierungen und Halbleiterwerkstoffe

Werkstoff	Spezif. Widerstd. bei 20° C ρ $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	Spezif. Leitwert bei 20° C $\kappa = 1/\rho$ $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	Widerstds.-Temp.-Koeff. $\alpha \times 10^{-3}$ $\Omega/^\circ\text{C}$
Platin-Rhodium (10% Rh)	0,2	5,0	+1,7
Platinsilber	0,261	3,83	+0,3
Patentnickel, Kupfernichel (75% Cu, 25% Ni)	0,33	3,0	+0,19
Neusilber, Argentan, Nickelin (60...70% Cu, 20...33% Ni, 20...23% Zn)	0,3...0,4	3,3...2,5	+0,3
Blanca	0,47	2,12	+0,11
Resistin	0,49	2,04	+0,02
Rheotan	0,49	2,04	+0,023
Spezial	0,49	2,04	+0,04
Kulmiz	0,74	1,35	+0,008
Kupfer-Manganlegierung (25% Mn)	0,81	1,23	+0,05
Eisen-Nickel (70% Fe, 30% Ni)	0,84	1,19	+0,7
Kruppin (Fe, Ni)	0,85	1,18	+0,07
Superior	0,85	1,18	+0,07
Kupfer-Manganlegierung (30% Mn)	1,073	0,93	+0,04
Kanthal D	1,35	0,742	+0,091
Kanthal A	1,39	0,72	+0,088
Halbleitermaterial			
Graphit, grönländischer	4,0	0,25	—
Graphit, sibirischer	12,0	0,083	—
Gaskohle	50...70	0,02...0,014	-0,02...-0,8
Bogenlichtkohle	13...100	0,077...0,01	-0,8
Spezial-Kohle-Gemische auf Lackbasis	*)	*)	-0,3...-4,0
Kristalline Glanzkohle	40	0,025	-0,1...-0,7

*) Je nach Mischungsverhältnis verschieden.

Unter dem Einfluß dieser im Widerstand entwickelten Wärme steigt seine Temperatur t an. Dieser Temperaturanstieg ist jedoch der Erwärmungszeit τ nicht proportional, sondern wird durch die mit wachsender Temperatur ebenfalls ansteigenden Wärmeverluste, d. s. innere und äußere Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Wärmeübergang durch Luftströmung (Konvektion), beeinflusst. Je größer die in einer bestimmten Zeit entwickelte Wärmemenge gegenüber den in der gleichen Zeit entstandenen Wärmeverlusten ist, desto höher steigt auch die Temperatur des Widerstandes t . Und zwar steigt sie solange, bis die abgegebene Wärme gleich der zugeführten wird und sie mit diesem Gleichgewichtszustand einen maximalen Wert t_{max} erreicht. Der Vorgang ist analog

dem des Aufladens eines Kondensators über einen Widerstand, so daß sich die in **Bild 1** dargestellte Abhängigkeit

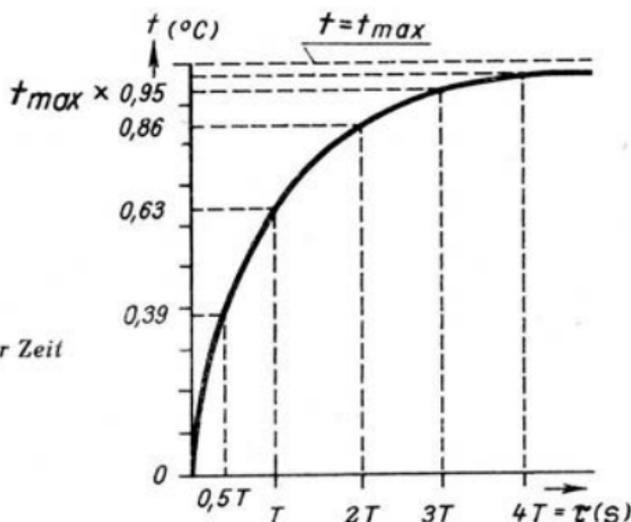


Bild 1.
Temperaturanstieg mit der Zeit

des Temperaturverlaufes t von der Zeit τ ergibt, der folgende Gleichung zugrundeliegt:

$$t = t_{max} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}}\right) \quad (5)$$

T ist hierin die Zeitkonstante des Widerstandes und gleich dem Verhältnis Wärmekapazität K ($Ws/^\circ C$) zu Wärmeabgabefähigkeit A ($W/^\circ C$) des Widerstandes. Hierbei bestimmt sich K aus $K = c \cdot G$ (G = Gewicht des Widerstandskörpers in g , c = spezifische Wärme des Widerstandskörpers hier in $Ws/g, ^\circ C$, wobei $1 \text{ cal} = 4,19 \text{ Ws}$) und A aus $A = \mu \cdot F$ (F = abkühlende Oberfläche in cm^2 , μ = Wärmeabgabekoeffizient in $W/cm^2, ^\circ C$). Die Zeitkonstante T ist für jeden Widerstand eine charakteristische Größe und läßt sich nur experimentell bestimmen, da insbesondere μ von rechnerisch im voraus nicht bestimmbar Einflüssen, wie konstruktiver Ausbildung, Einbauverhältnissen des Widerstandes usw., abhängt.

Da weiterhin $t_{max} = N/A$, so wird die zulässige Belastung N_z eines Widerstandes (Grenzdauerlast), wenn man für den Widerstand eine bestimmte Grenztemperatur t_{max} festlegt,

$$N_z = A \cdot t_{max} = \mu \cdot F \cdot t_{max} \text{ in W} \quad (6)$$

und damit seine zulässige spezifische Belastung, nämlich pro 1 cm^2 Abkühlungsfläche,

$$N_z' = \mu \cdot t_{\max} \text{ in W/cm}^2 \quad (7)$$

Für Widerstände gleicher Ausführungsart sind damit Erfahrungswerte für N_z' ermittelt worden und dann in der Vorausberechnung anwendbar. Solche spezifischen Werte sind daher auch später bei den betr. Widerstandstypen angegeben worden.

Ist die zulässige Wattbelastung eines Widerstandes aus $N_z = N_z' \cdot F$ (oder auch vom Aufdruck her) bekannt, so errechnet sich seine zulässige Strom- und Spannungsbelastung aus

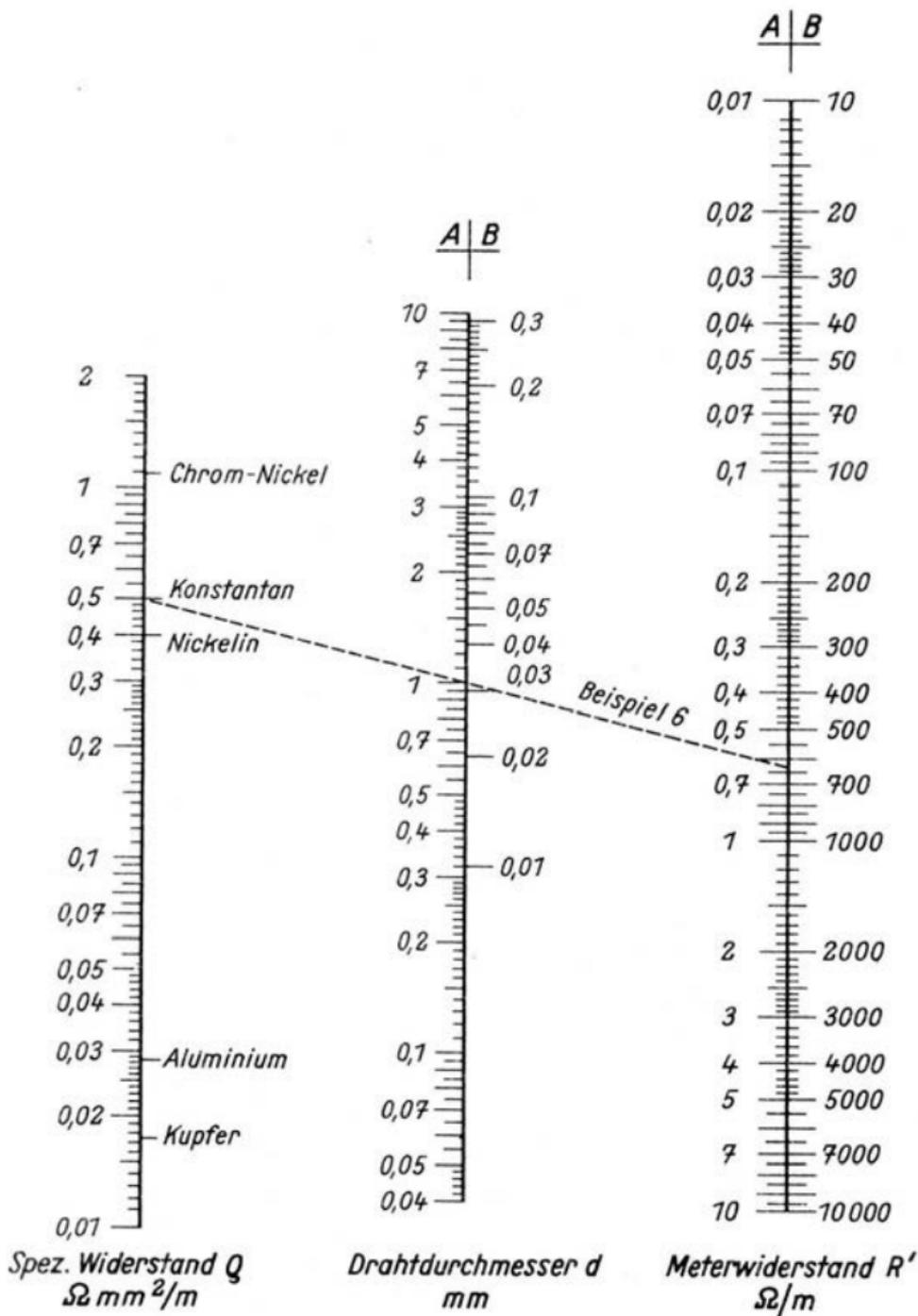
$$I_z = \sqrt{\frac{N_z}{R}} \text{ bzw. } U_z = \sqrt{N_z \cdot R} \quad (8_{a+b})$$

Hierbei ist jedoch zu beachten, daß Widerstände oft nicht nur eine Gleichstrombelastung N_g zu vernichten haben, sondern auch mit einer zusätzlichen Wechselstromleistung N_w belastet sind. Beide addieren sich in diesem Falle zur Gesamtleistung $N_z = N_g + N_w$.

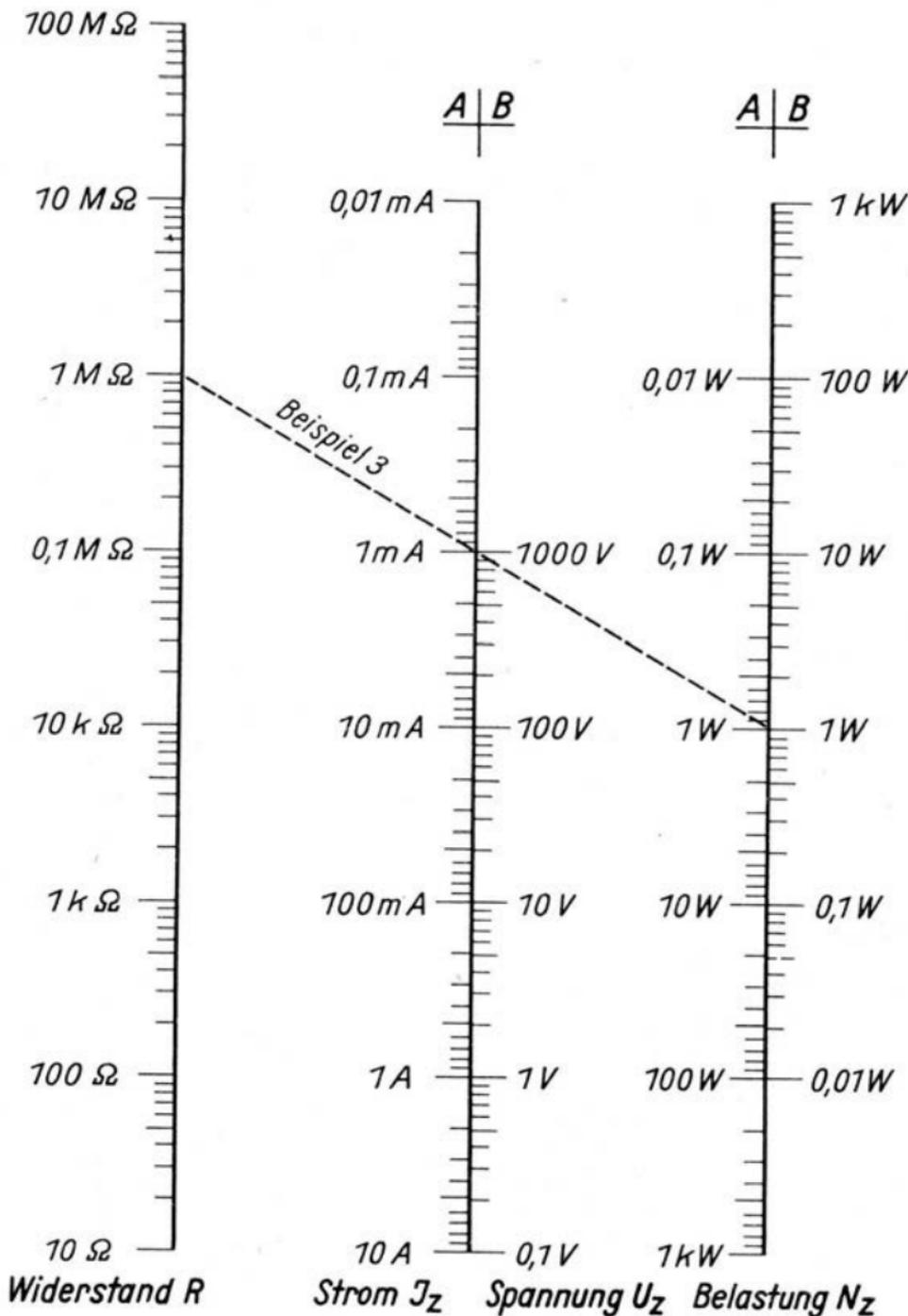
Die Ermittlung der Werte von I_z und U_z ist mit *Nomogramm 3* möglich.

Beispiel 3: Bekannt sind der Widerstandswert $R = 1 \text{ M}\Omega$ und die zulässige Belastung $N_z = 1 \text{ W}$. Gesucht werden der zulässige Strom I_z und die zulässige Spannung U_z . Im *Nomogramm 3* schneidet die Verbindungslinie $1 \text{ M}\Omega \dots 1 \text{ W}$ die Stromleiter bei $I_z = 1 \text{ mA}$ und die Spannungsleiter bei $U_z = 1000 \text{ V}$.

Für die Genauigkeit eines Widerstandswertes ist es weiterhin von Bedeutung, daß er sich *mit der Temperatur ändert*. Aus diesem Grunde werden auch die Werte für den spezifischen Widerstand ϱ stets für eine bestimmte Bezugstemperatur (Raumtemperatur $t_0 = 18^\circ$ oder 20° C) angegeben. Die Größe der Widerstandsänderung wird durch den *Temperaturkoeffizienten* oder *Temperaturbeiwert* zum spezifischen Widerstand α ($\Omega/^\circ \text{ C}$ oder $\%/^\circ \text{ C}$) ausgedrückt. Er gibt die verhältnismäßige Widerstandszu- oder -abnahme bei 1° C Temperaturunterschied und bezogen auf den Widerstandswert des Widerstandes von 1 Ohm an. Er kann in einem bestimmten Tempe-



Nomogramm 2. Ermittlung des Meterwiderstandes
Erläuterung siehe Seite 26



Nomogramm 5.

Beziehung zwischen Widerstand, Strom bzw. Spannung und Belastung
 Erläuterung siehe Seite 18

raturbereich ebenfalls als Materialkonstante betrachtet werden, d. h. innerhalb dieses Bereiches sind mit hinreichender Genauigkeit die Widerstandsänderungen den Temperaturänderungen proportional (gegebenenfalls als Mittelwert). Da die Widerstandsänderung $R_{t_0} \cdot \alpha (t - t_0)$ beträgt, errechnet sich die Größe des Widerstandes bei der Temperatur t aus

$$R_t = R_{t_0} (1 \pm \alpha [t - t_0]) \text{ in Ohm.} \quad (9 \text{ a})$$

Hierin bedeuten:

- R_t = Widerstand des Leiters bei der Temperatur t in Ohm,
- R_{t_0} = Widerstand des Leiters bei der Temperatur t_0 in Ohm,
- α = Temperaturbeiwert (+ Widerstandszunahme, — Widerstandsabnahme) in $\Omega/^\circ\text{C}$,
- t_0 = Raum- oder Bezugstemperatur in $^\circ\text{C}$,
- t = Betriebstemperatur in $^\circ\text{C}$.

In gleicher Weise gilt dann für den spezifischen Widerstand bei der Temperatur t

$$\rho_t = \rho (1 \pm \alpha [t - t_0]) \text{ in } \Omega \text{ mm}^2/\text{m} \quad (9 \text{ b})$$

Werte für α sind enthalten in Tafel 1 für reine Metalle, in Tafel 2 für die wichtigsten Metallegierungen, in Tafel 3 a (Spalte 5 und 6), Tafel 3 b (Spalte 5 und 14) und Tafel 3 c (Spalte 5) für metallische Widerstandswerkstoffe und in Tafel 3 d für die älteren metallischen Widerstandslegierungen und Halbleiterwerkstoffe. Ein Vergleich der Werte zeigt, daß der Widerstand der meisten Metalle und Metallegierungen mit wachsender Temperatur zunimmt. α ist dann positiv. Bei einigen Widerstandslegierungen (Kupfer- und Silberlegierungen) und stets bei Kohle ist α negativ, da ihr Widerstand mit wachsender Temperatur sinkt.

Ein guter Widerstandswerkstoff zeichnet sich in elektrischer Beziehung durch einen hohen Wert für ρ und einen kleinen Wert für α aus. Zur Erreichung dieses Zieles war es notwendig, geeignete Metallegierungen und Halbleiterwerkstoffe zu schaffen. Mit Rücksicht auf ausreichende Genauigkeit des Widerstandswertes soll man sich bei der Auswahl eines Widerstandswerkstoffes durch eine Kontrollrechnung stets davon überzeugen, ob innerhalb des Temperaturbereiches, in dem

der Widerstand Verwendung finden soll, die Widerstandsänderung ihre zulässige Grenze nicht überschreitet.

Beispiel 4: Es ist der Widerstandswert eines Eisen-Nickeldrahtes (nach Tafel 3 d ist $\varrho = 0,84 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$) mit einem Durchmesser $d = 0,1 \text{ mm}$ (nach Tafel 5, Spalte 2, ist $q = 0,00785 \text{ mm}^2$) und einer Länge $l = 10 \text{ m}$ für eine Temperatur von 77° C festzustellen.

Der Widerstand ist bei $t_0 = 20^\circ \text{ C}$ nach Gleichung (1)

$$R_0 = \frac{l \cdot \varrho}{q} = \frac{10 \cdot 0,84}{0,00785} = 1070 \text{ Ohm.}$$

Mit einem $\alpha = +0,7 \cdot 10^{-3}$ aus Tafel 3 d ist dann nach Gleichung (9a) $R_t = R_0 (1 + \alpha [t - t_0]) = 1070 (1 + 0,7 \cdot 10^{-3} [77 - 20]) = 1112,7 \text{ Ohm}$. Die Widerstandszunahme beträgt somit $42,7 \text{ Ohm}$, d. s. 4% . Ist diese Widerstandsänderung aus bestimmten Gründen nicht tragbar, so ist ein Widerstandsmaterial mit etwa gleichem ϱ , aber kleinerem α zu wählen, z. B. Kruppin nach Tafel 3 d mit einem $\varrho = 0,85 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ und $\alpha = +0,07 \cdot 10^{-3} \Omega/^\circ \text{ C}$. Findet der Widerstand stets unter den gleichen Belastungsverhältnissen Verwendung, so kann man ihn auch in der Länge kürzen. Der spezifische Widerstand bei der Temperatur $t = 77^\circ \text{ C}$ ist nach Gleichung (9 b) $\varrho_t = \varrho (1 + \alpha [t - t_0]) = 0,84 (1 + 0,7 \cdot 10^{-3} [77 - 20]) = 0,873 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$. Damit wird die Länge des Drahtes

$$l = \frac{R_0 \cdot q}{\varrho_t} = \frac{1070 \cdot 0,00785}{0,873} = 9,6 \text{ m,}$$

d. i. ebenfalls um 4% kürzer.

Bei bekanntem α läßt sich auch umgekehrt aus der Widerstandsänderung, d. i. bei konstanter Spannung U gleichbedeutend mit einer Stromänderung I , die Temperatur eines Widerstandes ermitteln. Das ist insbesondere für solche Widerstände von Bedeutung, die mit dem Thermometer unzugänglich sind, und findet daher auch bei Trafos, Drosselspulen u. ä. Anwendung. Sind in einem Temperaturbereich t_1 und t_2 , bei dem α als Mittelwert gilt, die Widerstandswerte R_{t_1} und R_{t_2} gemessen worden, so ist $R_{t_1} = R_{t_0} (1 + \alpha [t_1 - t_0])$, $R_{t_2} = R_{t_0} (1 + \alpha [t_2 - t_0])$ und damit durch Subtraktion $R_{t_2} - R_{t_1} = R_{t_0} \cdot \alpha ([t_2 - t_0] - [t_1 - t_0]) = R_{t_0} \cdot \alpha (t_2 - t_1)$ und durch Umformung

$$t_2 - t_1 = \frac{R_{t_2} - R_{t_1}}{\alpha \cdot R_{t_0}} = \frac{R_{t_2} - R_{t_1}}{\alpha' \cdot R_{t_1}} \quad (10)$$

worin

$$\alpha' = \frac{\alpha}{1 + \alpha (t_1 - t_0)}$$

Beispiel 5: Sind bei einem Widerstand mit einem $\alpha = +0,0045 \Omega/^{\circ}\text{C}$ (bei $t_0 = 18^{\circ}\text{C}$) folgende Werte gemessen worden: $R_{t_1} = 40 \text{ Ohm}$, $R_{t_2} = 47 \text{ Ohm}$ und $t_1 = 38^{\circ}\text{C}$, so ist die Über-temperatur nach Gleichung (10)

$$t_2 - t_1 = \frac{47 - 40}{0,00596 \cdot 40} = 44,2^{\circ}\text{C}$$

und damit $t_2 = 44,2 + 38 = 82,2^{\circ}\text{C}$.

Widerstände für Meßzwecke müssen ein sehr kleines α besitzen, um das Meßergebnis nach dem geforderten Genauigkeitsgrad der Messung ausreichend temperaturunabhängig machen zu können. Hierzu dienen außer Schichtwiderständen der Güteklasse 0,5 (z. B. in Vielfach-Meßgeräten) die Legierungen Konstantan, Manganin, Isabellin, Novokonstant und A-Legierung (Therlo) (Tafel 5 a) mit einem $\alpha = -0,04 \cdot 10^{-3}$ bis $\alpha = +0,03 \cdot 10^{-3} \Omega/^{\circ}\text{C}$. Während die α -Werte der letzten drei genannten Legierungen nur für einen Temperaturbereich in der Umgebung der Raumtemperatur (etwa zwischen 10° und 30°C) gelten, ist der Temperaturbereich des α -Wertes von Konstantan größer und liegt etwa zwischen 20° und 100°C . Andererseits besitzt jedoch Konstantan mit $-40 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ gegenüber z. B. Manganin mit $+1 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ eine 40 mal größere Thermokraft gegen Kupfer und ist daher für geringe Meßspannungen unbrauchbar. Der geringe Temperaturbeiwert dieser vier Legierungen dient auch häufig dazu, die durch Temperaturerhöhung eintretende Widerstandserhöhung anderer Materialien, z. B. des Kupfers, auszugleichen. Ist z. B. in einem Meßinstrument der Widerstand der aus Kupfer bestehenden Spule 50 Ohm mit einem $\alpha = +0,004 \Omega/^{\circ}\text{C}$ und schaltet man ihr zur Spannungsmessung einen Konstantanwiderstand von 9950 Ohm in Reihe, so sinkt der Temperaturkoeffizient des ganzen Instrumentes auf

$$\alpha = \frac{50 \cdot 0,004 + 9950 \cdot -0,00003}{50 + 9950} = -1 \cdot 10^{-5} \Omega/^{\circ}\text{C}.$$

Für größere Temperaturbereiche oder für die Genauigkeit von Meß- und Vergleichswiderständen ist häufig die Annahme einer Proportionalität zwischen Widerstands- und Temperaturänderung nicht mehr ausreichend. Man stellt dann genauer die Widerstandsänderung dar als quadratische Funktion der Temperaturänderung und benutzt hierbei zwei Temperaturkoeffizienten α und β . Es ist dann der Widerstand bei der Temperatur t

$$R_t = R_{t_0} (1 + \alpha [t - t_0] + \beta [t - t_0]^2) \quad (11)$$

Werte für α und β sind in Tafel 3 b (Silberlegierungen) enthalten (Spalte 14 und 15). Sie gelten ebenfalls für Temperaturänderungen, die nur wenig von der Raumtemperatur $t_0 = 20^\circ \text{C}$ abweichen, d. i. neben den Raumtemperaturschwankungen nur für relativ kleine Wattbelastungen. Für Präzisions-Normalwiderstände mit einer Genauigkeit von $\pm 0,03\%$ ist sie z. B. mit maximal 1 Watt begrenzt worden.

3. Drahtgewickelte Widerstände

Die für die Herstellung drahtgewickelter Widerstände erforderlichen Widerstandsdrähte sind in den DIN 46 460 bis 46 462 in Gruppen eingeteilt und genormt worden. Um jedoch Fortschritte in der Entwicklung neuer Legierungen nicht zu hindern, sind nicht bestimmte Widerstandslegierungen, sondern nur ihre spezifischen Widerstände mit einem ausreichenden Spielraum genormt worden. Die Normen enthalten folgende Gruppen: WM 15, WM 30, WM 45, WM 50, WM 100, WM 110 und WM 120, und es gelten z. B. folgende Werte für ρ :

WM 15: Eisen verzinkt oder verzinkt (als Rostschutz):

Rechenwert: $\rho = 0,13 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$

Mindestwert: $\rho_{\text{min}} = 0,12 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$

Höchstwert: $\rho_{\text{max}} = 0,14 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$

WM 30: Vorwiegend Kupfer-Nickellegierungen, die auch Zink enthalten dürfen:

Rechenwert: $\rho = 0,30 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$

Mindestwert: $\rho_{\text{min}} = 0,28 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$

Höchstwert: $\rho_{\text{max}} = 0,32 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ usw.

Die tatsächlichen Drahtdurchmesser weichen entsprechend diesem Spielraum von q innerhalb ebenfalls vorgeschriebener Toleranzen vom Nenndurchmesser ab, da Widerstandsdrähte nicht auf einen bestimmten Durchmesser, sondern auf einen bestimmten Widerstandswert für die Meterlänge gezogen werden. Die meist gebrauchten genormten Nenndurchmesser der blanken Widerstandsdrähte gemäß DIN 46 461 und die Größtwerte der Außendurchmesser isolierter Drähte gemäß DIN 46 435 und 46 462 sind in Tafel 4 zusammengestellt worden.

Die Bestellung der Drähte soll nach der Normvorschrift nur nach dem genormten Nenndurchmesser und dem Gruppennormalwert für q u. U. unter Hinzufügung der Sonderbezeichnung des Herstellers und des gewünschten Härtegrades erfolgen, z. B.: „Widerstandsdraht 1,2 DIN 46 461, WM 50, Isabellin, weich“ für einen blanken Widerstandsdraht und „Widerstandsdraht SS 1,2 DIN 46 462, WM 50, Isabellin, weich“ für einen isolierten Draht mit zweifacher Seidenbespinnung.

Da aus den DI-Normen die handelsüblichen Drahtsorten mit ihren von den Herstellerfirmen festgelegten Typenbezeichnungen nicht hervorgehen, sind diese in den Tafeln 3 a bis 3 d nach metallurgischen Gesichtspunkten geordnet zusammengestellt worden. Ihr q -Wert gibt jeweils an, zu welcher DIN-Gruppe sie gehören, da die Gruppen-Nummer dem Rechnungswert von q entspricht. Zur eingehenden Beurteilung der Verwendbarkeit der Widerstandsdrähte sind auch noch eine Anzahl weiterer Eigenschaften, wie z. B. Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärme, Schmelzpunkt, Ausdehnungskoeffizient usw., aufgenommen worden.

Zur schnellen Ermittlung des Widerstandswertes genormter Drahtdurchmesser enthält Tafel 5 mit Hilfe von Gleichung (1), nämlich $R' = q/q$ da $l = 1$ m, errechnete Werte für den Widerstand einer Meterlänge (Meterwiderstand R' in Ω/m). Zur Vereinfachung wurden hierbei die Widerstandswerkstoffe in Gruppen mit mittlerem spezifischen Widerstand q_m zusammengefaßt mit einer größten Abweichung von den Rechenwerten in Höhe von $\pm 0,05 \Omega \text{ mm}^2/m$, die jedoch im Hinblick

auf den Grenzwertbereich der Widerstände meist bedeutungslos ist.

Dem gleichen Zweck dient Nomogramm 2, bei dem man nicht an bestimmte Werte von ρ und d gebunden ist.

Beispiel 6: Es ist der Meterwiderstand R' eines Konstantandrahtes von $d = 1$ mm Durchmesser zu ermitteln.

In Tafel 5, Spalte 6, findet man für $d = 1$ mm ein $R' = 0,612 \Omega/\text{m}$ ($\rho_m = 0,48 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$) und mit Hilfe von Nomogramm 2 einen genaueren Wert $R' = 0,64 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ (nach Tafel 3 a ist $\rho = 0,5 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$), wenn man hier Punkt 0,5 auf der Spez.-Widerstands-Leiter mit Punkt 1 auf der A-Seite der Drahtdurchmesser-Leiter durch eine Gerade verbindet, die die A-Seite der Meterwiderstands-Leiter im Punkt 0,64 trifft.

Umgekehrt läßt sich auch mit Hilfe von R' auf ρ und das vermutliche Widerstandsmaterial schließen. Hat man z. B. den Widerstand eines Drahtes von $d = 1$ mm und $l = 50$ m mit $R = 32$ Ohm gemessen, so ist $R' = 32/50 = 0,64$, $\rho = 0,5$ und das Material vermutlich Konstantan.

Da Tafel 5 nach steigenden Widerstandswerten geordnet ist, läßt sich mit ihr auch weiterhin ein passender Widerstandswert dann leicht finden, wenn man bei vorhandenem Widerstandskörper an eine bestimmte Drahtlänge gebunden ist und ein bestimmter Widerstandswert aufgebracht werden muß. Hat man z. B. einen Widerstandskörper verfügbar, der bei 0,06 mm Drahtdurchmesser eine Drahtlänge von 5 m aufnehmen kann und soll der Widerstand 1,5 k Ω betragen, so ist $R' = 1500/5 = 300 \Omega/\text{m}$, d. i. gem. Spalte 9 der Tafel 5, je nachdem was erreichbar oder verfügbar ist, Cu—Mn 25 %, Fe—Ni 30 %, Kruppin oder Superior.

Handelsübliche, drahtgewickelte Festwiderstände für die Nachrichtentechnik bis 50 W (nicht angezapft, einlagig gewickelt, nicht induktionsfrei, lackiert oder unlackiert) sind bei einer Oberflächengrenztemperatur $t_{\text{max}} = 170^\circ \text{C}$ (nach DIN 41 410 Widerstand hierbei waagrecht frei aufgehängt und Raumtemperatur $t_0 = 20^\circ \text{C}$) in folgende Nenn- oder Dauerlastgruppen eingeteilt: $N_z = 0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 12, 25$ und 50 W. Vier weitere Zwischenwerte ab 5 W sind zu erwarten.

In Abhängigkeit von diesen Belastungswerten sind Abmessungen und Körperform der keramischen Widerstandsträger in DIN 41 411 bis 41 423 genormt worden. Als Widerstandswerte sind folgende Größen zu bevorzugen

Ω	1 10 100	1,25 12,5 125	1,6 16 160	2 20 200	2,5 25 250	3 30 300	4 40 400	5 50 500	6 60 600	8 80 800
k Ω	1 10 100	1,25 12,5 —	1,6 16 —	2 20 —	2,5 25 —	3 30 —	4 40 —	5 50 —	6 60 —	8 80 —

Für die Genauigkeit der Widerstände werden 3 Klassen unterschieden, nämlich 1, 2 und 5. Für sie gelten folgende Genauigkeitswerte:

		Genauigkeits-Klasse		
		1	2	5
Auslieferungstoleranz = Abweichung des Widerstandswertes in % vom Nennwert bei Auslieferung vom Hersteller (Herstellungstoleranz, Bezugstemperatur 20° C)		± 1	± 2	± 5
Temperaturbeiwert $\alpha \times 10^{-3} \Omega/^{\circ}C$ (Mittelwert zwischen 20 und 150° C)		± 0,1	± 0,2	± 1
zulässige Widerstandsänderung in % vom Istwert	nach 5000stdg. Lagerung, unbelastet bei 20° C u. 60...70% relativer Luftfeuchtigkeit	± 0,1	± 0,2	± 0,5
	nach 5000stdg. Belastung mit der Nennlast	< 0,5	< 0,5	< 1
Minestdrahtdurchmesser mm		0,04	0,04	0,03
größte Konstante der Windungssteigung k		2	3	4

Im ungünstigsten Falle, wenn sich Auslieferungs-, Lagerungs- und Belastungstoleranz nach einer Seite voll auswirken, ist mit Abweichungen in der Größe $\pm 1,6$, $\pm 2,7$ und $\pm 6,5$ % vom Nennwert zu rechnen. Hinzu kommt dann noch die Widerstandsänderung durch den Temperatureinfluß. Diese Normwerte können für die Neuanfertigung oder Neubewicklung beschädigter Festwiderstände als Richtschnur dienen.

Für den Einsatz fester Drahtwiderstände ist zu beachten, daß die Betriebslast im allgemeinen der Nennlast entsprechen soll. Bei aufgelockertem Einbau, zusätzlicher Kühlung durch Schornsteinwirkung, die durch senkrechte Anord-

nung des Widerstandes erzielbar ist und durch Verwendung von Rohrkörpern besonders wirksam wird (die Temperatursenkung beträgt etwa 20 %), weiterhin bei dickdrähtigen und unlackierten Widerständen kann sie auch überschritten werden. Dagegen muß bei gedrängtem Einbau und besonders ungünstigen Abkühlungsverhältnissen die Betriebslast unter der Nennlast bleiben. Die Überlastbarkeit von festen Drahtwiderständen für Nachrichtengeräte wird im übrigen nach DIN 41 410 durch zweifache Nennlast 60 Sekunden lang, durch vierfache Nennlast 20 Sekunden lang oder durch achtfache Nennlast 10 Sekunden lang geprüft, wobei die Oberflächengrenztemperatur von 170° C nicht überschritten werden darf.

Für die *Berechnung drahtgewickelter Widerstände* können folgende spezifischen Belastungswerte dienen:

- a) Feste Widerstände auf keramischen Körpern mit oder ohne Lack-Schutzschicht, einlagig gewickelt:

$$t_{\max} = 100^{\circ} \text{ C bis } 170^{\circ} \text{ C, } N_z' = 0,5 \text{ bis } 0,65 \text{ W/cm}^2.$$

- b) Feste Hochleistungswiderstände auf keramischen Körpern mit keramischer Glasur, einlagig gewickelt:

$$t_{\max} = 350^{\circ} \text{ C, } N_z' = 1,5 \text{ W/cm}^2.$$

- c) Rohrwiderstände höherer Belastungsfähigkeit (Vorschalt- und Regulierwiderstände) mit oder ohne Anzapfung:

einlagig gewickelt: $t_{\max} = 120^{\circ} \text{ C, } N_z' = 0,15 \text{ bis } 0,35 \text{ W/cm}^2,$

mehrlag. gewickelt: $t_{\max} = 120^{\circ} \text{ C, } N_z' = 0,06 \text{ bis } 0,1 \text{ W/cm}^2,$

eingebettet: $t_{\max} = 120^{\circ} \text{ C, } N_z' = 0,02 \text{ bis } 0,035 \text{ W/cm}^2.$

- d) Zementierte Drahtwiderstände; sie tragen eine keramische Zementschicht ähnlich den Zahnzementen und sind bis 300° C dauernd belastbar. Sie liegen damit zwischen den lackierten und den glasierten Widerständen, sind billiger als glasierte und können mit engerer Werttoleranz hergestellt werden, da sie den Glasurschmelzvorgang nicht durchzumachen haben: $t_{\max} = 300^{\circ} \text{ C, } N_z' = 0,8 \text{ bis } 0,9 \text{ W/cm}^2.$

Der Drahtdurchmesser läßt sich berechnen aus:

$$d \approx \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \varrho \cdot N}{10 \cdot \pi \cdot N_z' \cdot k \cdot R}} \quad \text{in mm} \quad (12)$$

Hierin bedeuten:

- d = Durchmesser des Widerstandsdrahtes in mm,
 ϱ = spezifischer Widerstand des Drahtmaterials in $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$,
 N = erforderliche Betriebslast in W,
 N_z' = zulässige spezifische Belastung in W/cm^2 ,
 k = Konstante der Windungssteigung.

Die Konstante k ergibt sich aus der Windungssteigung $h = k \cdot d$ als Vielfaches des Drahtdurchmessers d . Für eng gewickelte Widerstände, bei denen Windung an Windung liegt (oxydierte Drähte), also $h = d$ ist, ist $k = 1$. Mit wachsendem h steigt auch k . So wird z. B. $k = 2$, wenn $h = 2 \cdot d$. k ist in Gleichung (12) zunächst überschläglich anzunehmen.

Beispiel 7: Es ist ein fester Hochleistungswiderstand einlagig gewickelt, mit keramischer Glasur und einem Widerstandswert von $R = 2,5 \text{ k}\Omega$ der Genauigkeitsklasse 2 und für eine Belastung von 200 W zu berechnen. Als Drahtmaterial wird aus Tafel 3 c ein eisenhaltiger Chromnickeldraht (CrNiFe II oder Cekas) mit einem $\varrho = 1,12 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ und einem $\alpha = +0,13 \cdot 10^{-3} \Omega/^\circ\text{C}$ gewählt. Die Konstante k wird mit 1,1 angenommen. Mit $N_z' = 1,5 \text{ W}/\text{cm}^2$ für einlagige Hochleistungswiderstände mit keramischer Glasur errechnet sich der Drahtdurchmesser mit Gleichung (12) zu

$$d \approx \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \varrho \cdot N}{10 \cdot \pi \cdot N_z' \cdot k \cdot R}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,12 \cdot 200}{10 \cdot 3,14 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 2500}} \approx 0,19 \text{ mm}$$

Da dieser Durchmesser nach Tafel 4 nicht normgerecht ist, wurde gewählt $d = 0,2 \text{ mm}$.

Nach Tafel 5 hat dieser Durchmesser einen Meterwiderstand von $R' = 34,2 \Omega/\text{m}$. Steht ein Widerstandsträger mit einem Durchmesser $D = 30 \text{ mm}$ zur Verfügung, so beträgt die Länge einer Windung

$$l_1 = \pi (D + d) = \pi (30 + 0,2) = 95 \text{ mm} = 0,095 \text{ m}.$$

Der Widerstand einer Windung ist

$$r_1 = R' \cdot l_1 = 34,2 \cdot 0,095 = 3,25 \text{ Ohm}.$$

Es erhält daher der Widerstand eine Windungszahl von

$$n = \frac{R}{r_1} = \frac{2500}{3,25} = 770 \text{ Windungen}.$$

Bei der Steigungskonstanten $k = 1,1$ beansprucht der Widerstand eine freie Widerstandslänge zwischen den Anschlußschellen von $L_w = n \cdot k \cdot d = 770 \cdot 1,1 \cdot 0,2 = 170 \text{ mm}$.

**Tafel 4. Durchmesser der blanken und isolierten
Widerstandsdrähte**

Nenn- durch- messer des blanken Drahtes d mm	Größtwert des isolierten Außendurchmessers				
	Seide		Baumwolle 2 × be- spinnen BB mm	Lack L mm	Emaile mm
	1 × be- spinnen S mm	2 × be- spinnen SS mm			
0,03	0,065	0,10	—	0,045	0,06
0,04	0,075	0,11	—	0,055	0,07
0,05	0,085	0,12	—	0,065	0,08
0,06	0,095	0,13	—	0,08	0,09
0,07	0,105	0,14	—	0,09	0,10
0,08	0,115	0,15	—	0,10	0,12
0,09	0,125	0,16	—	0,11	0,13
0,1	0,135	0,17	—	0,12	0,14
0,11	0,145	0,18	0,27	0,135	0,15
0,12	0,155	0,19	0,28	0,145	0,16
0,14	0,175	0,21	0,30	0,165	0,19
0,15	0,185	0,22	0,31	0,175	0,20
0,16	0,195	0,23	0,32	0,185	0,21
0,18	0,215	0,25	0,34	0,205	0,23
0,2	0,235	0,27	0,36	0,225	0,26
0,22	0,26	0,29	0,38	0,25	0,29
0,25	0,29	0,32	0,41	0,28	0,32
0,28	0,32	0,35	0,44	0,31	0,35
0,3	0,34	0,37	0,46	0,33	0,37
0,32	0,36	0,39	0,52	0,357	0,39
0,35	0,40	0,42	0,55	0,387	0,42
0,4	0,44	0,47	0,60	0,437	0,49
0,45	0,49	0,52	0,65	0,492	0,54
0,5	0,54	0,57	0,70	0,542	0,59
0,55	0,59	0,63	0,77	0,60	0,65
0,6	0,64	0,68	0,82	0,65	0,70
0,65	0,69	0,73	0,87	0,70	0,75
0,7	0,74	0,78	0,92	0,75	0,80
0,8	0,84	0,88	1,02	0,86	0,90
0,9	0,94	0,98	1,12	0,96	1,00
1	1,04	1,08	1,22	1,06	1,15
1,1	1,14	1,18	1,32	1,175	1,25
1,2	1,24	1,28	1,42	1,275	1,35
1,4	1,44	1,48	1,62	1,475	1,55
1,6	—	—	1,86	1,675	1,80
1,8	—	—	2,06	1,875	2,00
2	—	—	2,26	2,075	2,20
2,2	—	—	2,46	2,285	—
2,5	—	—	2,76	2,585	—
2,8	—	—	3,06	2,885	—
3	—	—	3,26	3,085	—
3,3	—	—	3,60	—	—
3,5	—	—	3,80	—	—

Für WM 30, WM 50 und WM 100

Benötigt wird eine Drahtlänge von

$$L_d = l_1 \cdot n = 0,095 \cdot 770 = 73,2 \text{ m.}$$

Die Kontrollrechnung ergibt dann einen Widerstandswert von

$$R = L_d \cdot R' = 73,2 \cdot 34,2 = 2500 \text{ Ohm.}$$
$$\text{für } N = l_1 \cdot L_w \cdot N_z' = 9,5 \cdot 17 \cdot 1,5 = 240 \text{ W.}$$

Bei *isolierten Widerstandsdrähten* muß in der Belastung des Drahtes auf die Grenztemperatur des Isolierstoffes Rücksicht genommen werden. Sie beträgt für

Lack	80...90° C
Baumwolle, ungetränkt	85° C
Baumwolle, getränkt	90° C
Seide	100° C

Im Gegensatz zu der im Abschnitt 2 behandelten Oberflächentemperatur des Widerstandskörpers erfordern diese Rücksichten hier eine höchstzulässige Temperatur an der Oberfläche des Drahtes selbst und damit für jeden Querschnitt der Leitung eine bestimmte höchstzulässige Stromstärke. Sie ist genau genommen nicht nur von der Größe der abkühlenden Leiteroberfläche, sondern auch von der Dauer der Belastung, der Wickelart (einlagig — mehrlagig, große — kleine Windungssteigung usw.) und weiterhin nicht nur von der Isolationsart, sondern auch von der Isolationsstärke abhängig. Die in DIN 46 460 enthaltenen und durch Versuch ermittelten Strombelastungswerte gelten mit ihren entsprechenden Temperaturwerten nur für blanke und in ruhiger Luft von 20° C frei ausgespannte Drähte im Dauerbetrieb. Die Wärmeabgabefähigkeit frei ausgespannter Drähte ist jedoch sehr groß. Es ergeben sich daher bei praktisch ausgeführten Widerständen mit steigender Behinderung der Wärmeabfuhr erhebliche Abweichungen. Die DIN-Werte können aber gegebenenfalls zum Vergleich verschieden starker Drähte herangezogen werden. Auch die im Transformatorenbau übliche Rechnungsart mit zulässiger Stromdichte, d. i. die pro mm² Leitungsquerschnitt zugelassene Stromstärke, ist für den Widerstandsbau nicht geeignet, da sie erfahrungs-

Tafel 5. Meterwiderstand der Widerstandsdrähte (Ω/m) in

Blanker Draht-		Platin-Rhodium	Hawe 30	Ni I	Isabellin	NBW 139
Durchmesser	Querschnitt	Platin-Silber Zinnfr. Leg.	Ni III Patent- nickel Neusilber	Nickelin Manganin NBW 87 NBW 173	Novo- konstant A-Leg. Konstan- tan NBW 108 Blanca Resistin Rheotan Spezial	
mm	mm ²	$\rho_m=0,23$	$\rho_m=0,34$	$\rho_m=0,43$	$\rho_m=0,48$	
1	2	3	4	5	6	7
0,03	0,000707	325	481	608	679	806
4	0,00126	182,5	250	341	381	452
5	0,00196	117	173,5	219	245	291
6	0,00283	81,3	120,0	152	169,5	202
7	0,00385	59,7	83,4	111,5	124,7	147
8	0,00503	45,7	67,6	85,6	95,5	113
9	0,00636	36,1	53,4	67,6	75,5	89,5
0,10	0,00785	29,3	43,3	54,8	61,2	72,6
1	0,00950	24,2	35,8	45,3	50,5	60,0
2	0,0113	20,4	30,1	38,0	42,5	50,4
4	0,0154	14,9	22,05	27,9	31,4	37,0
5	0,0177	13,0	19,4	24,3	27,1	32,2
6	0,0201	11,4	16,9	21,4	23,9	28,3
8	0,0254	9,05	13,4	16,93	18,9	22,4
0,20	0,0314	7,33	10,8	13,7	15,3	18,2
2	0,0380	6,05	8,95	11,3	12,65	15,0
5	0,0491	4,68	6,92	8,76	9,78	11,6
8	0,0616	3,73	5,51	6,98	7,80	9,25
0,30	0,0707	3,25	4,81	6,08	6,8	8,06
2	0,0804	2,86	4,23	5,35	5,97	7,10
5	0,0962	2,39	3,53	4,47	4,99	5,92
0,40	0,126	1,82	2,70	3,41	3,81	4,52
5	0,159	1,45	2,14	2,70	3,02	3,58
0,50	0,196	1,17	1,77	2,19	2,45	2,90
5	0,237	0,97	1,43	1,81	2,02	2,40
0,60	0,283	0,81	1,20	1,52	1,695	2,01
5	0,332	0,693	1,02	1,30	1,445	1,72
0,70	0,385	0,598	0,884	1,115	1,245	1,48
0,80	0,503	0,456	0,676	0,855	0,955	1,13
0,90	0,636	0,361	0,534	0,675	0,755	0,895
1,0	0,785	0,293	0,433	0,548	0,612	0,726
1	0,9503	0,241	0,357	0,453	0,505	0,600
2	1,13	0,204	0,30	0,380	0,425	0,504
4	1,559	0,148	0,218	0,276	0,304	0,366
6	2,011	0,114	0,169	0,214	0,238	0,283
8	2,54	0,090	0,134	0,169	0,189	0,224
2,0	3,14	0,073	0,108	0,137	0,153	0,182
2	3,80	0,060	0,0895	0,113	0,126	0,150
5	4,91	0,047	0,0692	0,0876	0,098	0,116
8	6,16	0,037	0,0551	0,0698	0,078	0,0925
3,0	7,07	0,032	0,0481	0,0608	0,068	0,0806
3	8,553	0,027	0,0397	0,0503	0,056	0,0666
5	9,621	0,024	0,0354	0,0448	0,050	0,0594

Gruppen zusammengefaßt bei mittlerem spez. Widerstand ρ_m

Kulmiz Chrom- Eisen- Silizium	Cu-Mn 25 % Fe-Ni 30% Kruppin Superior	Eisen- haltige u. Eisenfreie Chrom- Nickel, Cu-Mn 30 %	Chrom- Eisen- Alu- minium	Kanthal D Kanthal A	Kanthal A ₁	Kupfer Rech- nungswert nach DIN 46 441	Alu- minium
$\rho_m = 0,76$	$\rho_m = 0,85$	$\rho_m = 1,073$	$\rho_m = 1,25$	$\rho_m = 1,37$	$\rho = 1,45$	$\rho = 0,0178$	$\rho = 0,029$
8	9	10	11	12	13	14	15
1075	1200	1520	1770	1935	2050	24,82	36,65
603	674	853	992	1085	1150	13,26	23,0
388	433	548	638	699	740	8,94	13,25
268,5	300	380	442	484	512	6,21	9,2
197,5	220,5	279	325	356	376,5	4,56	6,76
151,0	168,5	214	249	272	288,0	3,49	5,17
119,5	133,5	169	196,5	215	228,0	2,76	4,08
96,8	108,1	137	159,5	174,2	184,5	2,23	3,31
80,0	89,5	113	131,5	144,2	152,5	1,846	2,74
67,2	75,2	95,2	110,5	121,2	128,2	1,551	2,30
49,3	55,2	69,8	81,2	89,0	94,2	1,140	1,69
42,9	48,0	60,6	70,6	72,4	82,0	0,993	1,47
37,8	42,3	53,4	62,2	68,2	72,1	0,873	1,29
29,9	33,4	42,3	49,2	54,0	58,1	0,689	1,00
24,2	27,1	34,2	39,8	43,6	46,2	0,558	0,83
20,0	22,4	28,3	32,9	36,0	38,1	0,462	0,68
15,45	17,3	21,85	25,4	27,9	29,5	0,357	0,53
12,31	13,8	17,43	20,2	22,2	23,6	0,285	0,47
10,75	12,0	15,2	17,7	19,4	20,5	0,248	0,37
9,45	10,055	13,35	15,5	17,0	18,1	0,218	0,36
7,9	8,84	11,15	13,0	14,4	15,1	0,1824	0,27
6,03	6,74	8,53	9,92	10,9	11,5	0,1396	0,21
4,78	5,34	6,75	7,86	8,6	9,1	0,1103	0,16
3,88	4,33	5,48	6,37	7,0	7,4	0,0894	0,132
3,21	3,59	4,54	5,28	5,8	6,1	0,0738	0,122
2,685	3,0	3,79	4,42	4,8	5,1	0,0621	0,092
2,285	2,56	3,24	3,76	4,1	4,4	0,0529	0,087
1,975	2,21	2,79	3,25	3,6	3,75	0,0456	0,067
1,51	1,69	2,14	2,49	2,72	2,88	0,0349	0,052
1,195	1,34	1,69	1,965	2,15	2,28	0,0276	0,041
0,97	1,08	1,37	1,59	1,74	1,85	0,0223	0,038
0,80	0,895	1,13	1,32	1,44	1,53	0,0187	0,031
0,673	0,752	0,95	1,105	1,26	1,28	0,016	0,023
0,487	0,545	0,69	0,802	0,88	0,93	0,0114	0,0186
0,378	0,422	0,535	0,622	0,68	0,72	0,0089	0,0144
0,299	0,334	0,596	0,492	0,54	0,57	0,007	0,010
0,242	0,270	0,342	0,398	0,44	0,46	0,006	0,008
0,20	0,224	0,282	0,329	0,36	0,38	0,0047	0,007
0,155	0,173	0,219	0,255	0,28	0,295	0,0036	0,005
0,123	0,138	0,174	0,203	0,222	0,235	0,0029	0,0042
0,1075	0,120	0,152	0,177	0,194	0,205	0,0025	0,0038
0,0888	0,099	0,126	0,146	0,160	0,170	0,0021	0,0034
0,0790	0,088	0,112	0,130	0,143	0,152	0,0018	0,0030

gemäß im Bereich der am meisten gebrauchten kleinen Drahtdurchmesser zu geringe Strombelastungswerte ergibt. Für alle Fälle hat sich dagegen folgende Erfahrungsformel für die höchstzulässige Stromstärke I_{\max} als ausreichend erwiesen

$$I_{\max} = 0,94 \cdot d \cdot \sqrt{\frac{d}{\varrho_t}} \quad \text{in A} \quad (13)$$

Hiermit wird dann die zulässige Wattbelastung isolierter Drähte $N_z = I_{\max}^2 \cdot R$.

Beispiel 8: Es ist die Strom- und Wattbelastung eines Widerstandes von $R = 100$ Ohm mit seideisoliertem Konstantandraht von 1 mm Durchmesser zu ermitteln.

Die Grenztemperatur für Seide ist $t = 100^\circ \text{C}$ und der spezifische Widerstand von Konstantan nach Tafel 3 a $\varrho = 0,5 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ bei einer Temperatur $t_0 = 20^\circ \text{C}$. Die Widerstandszunahme beträgt für Konstantan $\alpha = +0,03 \cdot 10^{-3} \Omega/^\circ\text{C}$, so daß nach Gleichung (9 b) $\varrho_t = \varrho (1 + \alpha [t - t_0]) = 0,5 (1 + 0,03 \cdot 10^{-3} [100 - 20]) = 0,5012 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$. Damit wird nach Gleichung (13) die höchstzulässige Strombelastung

$$I_{\max} = 0,94 \cdot d \cdot \sqrt{\frac{d}{\varrho_t}} = 0,94 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{1}{0,5012}} = 1,3 \text{ A.}$$

(Im Vergleich hierzu ist nach DIN 46 460, WM 50, für frei ausgespannten Konstantandraht von 1 mm Durchmesser und für 100°C Oberflächentemperatur $I_{\max} = 4 \text{ A}$).

Die zulässige Wattbelastung ist dann

$$N_z = I_{\max}^2 \cdot R = 1,3^2 \cdot 100 = 169 \text{ W.}$$

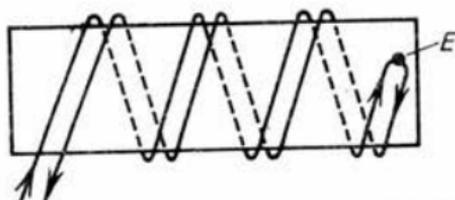
Abschließend sei darauf hingewiesen, daß sich drahtgewickelte Widerstände insbesondere zum Einsatz an solchen Stellen eignen, wo verhältnismäßig hohe elektrische Leistungen aufgenommen werden müssen, da ihre spezifische Belastungsfähigkeit N_z' etwa das Zwei- bis Sechsfache der von Schichtwiderständen beträgt. Bei ihrem Einbau ist daher auch darauf zu achten, daß sie sich nicht in der Nähe wärmeempfindlicher Teile befinden und durch gute Wärmeableitung Wärmestauungen, insbesondere in der Nähe von Spulen, vergossenen Kondensatoren usw. vermieden werden.

4. Induktions- und kapazitätsarme Wicklungsarten von Drahtwiderständen

Sollen drahtgewickelte Widerstände nicht nur im Gleichstrom-, sondern auch im niederfrequenten Wechselstromkreis Verwendung finden, so müssen sie unter bestimmten Umständen induktions- und kapazitätsarm sein.

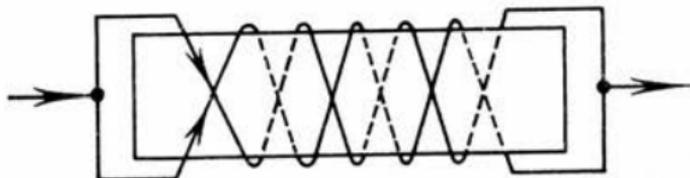
Induktivität ist immer dann vorhanden, wenn der Strom im Leiter ein magnetisches Feld erzeugen kann (Spule). Dies

Bild 2. Bifilare Wicklung (induktionsarm)



wird durch die bifilare oder Gegenwicklung nach Bild 2 verhindert. Sie entsteht im einfachsten Falle dadurch, daß man zwei Drähte zusammen aufwickelt und sie an einem Ende verbindet, so daß der Strom die Wicklung in entgegengesetzter Richtung durchfließt und die magnetisierende Wirkung der einen Spule die der anderen aufhebt.

Bild 3. Kreuzwicklung (induktionsarm)



Die gleiche Wirkung erzielt man nach Bild 3 mit der sog. Kreuzwicklung, bei der von einem Ende des Widerstandes aus zwei getrennte Wicklungen im entgegengesetzten Sinne aufgebracht werden. Der ohmsche Widerstand eines Widerstandes mit Kreuzwicklung beträgt jedoch nur $\frac{1}{4}$ des Widerstandes eines gleichgroßen normalen, dagegen die zulässige Belastung das Doppelte.

Von Kapazität spricht man, wo eine Ladung oder ein elektrisches Feld auftritt. Bei einem drahtgewickelten Widerstand ist das dort der Fall, wo benachbarte Drähte durch den Spannungsabfall von Windung zu Windung ein verschiedenes Potential besitzen. Sie ist geringer bei einfacher Lagenwicklung und größer bei mehrlagigen Widerständen. Sie ist auch bei

bifilarer Wicklung vorhanden und muß vorwiegend bei Meßwiderständen berücksichtigt werden, da bifilare Meßwiderstände oberhalb 100 Ohm im allgemeinen nicht mehr genügend kapazitätsfrei sind. Im Meßgerätebau hat sich daher die in Bild 4 gezeigte Mäanderwicklung eingeführt, bei der die

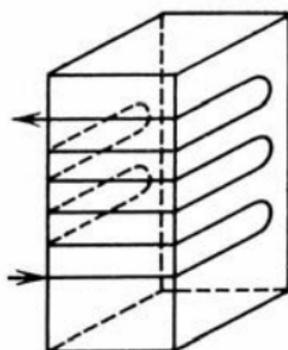


Bild 4.
Mäander-Wicklung
(kapazitäts- und
induktionsarm)

bifilare Wicklung in kurzen Lagen ausgeführt, d. h. die ganze Wicklung in kleine Abteilungen zerlegt wird, wodurch sich die kapazitiven Einflüsse verringern lassen.

Ehe wir uns im nächsten Kapitel den Schichtwiderständen zuwenden, soll hier wenigstens andeutungsweise auf das Kontaktierproblem bei Drahtwiderständen hingewiesen werden. Nicht unbedeutende Fachleute auf dem Radiogebiet wenden möglichst ausschließlich Schichtwiderstände an, weil es insbeson-

ondere bei der Massenfertigung nicht möglich sei, Drahtwiderstände zuverlässig zu kontaktieren, d. h. einen einwandfreien Dauerkontakt zwischen dem feinen Draht und der massiven Schelle zu schaffen. Diese Schwierigkeiten waren tatsächlich vorhanden, konnten aber durch ein geeignetes Schweißverfahren, das bei der Herstellung zementierter und glasierter Widerstände Anwendung findet, überwunden werden. Klemmkontaktierungen und Lötungen sind bei Drähten unter 0,1 mm im allgemeinen zu verwerfen.

5. Schichtwiderstände

Im Hinblick auf den kleinsten brauchbaren Drahtdurchmesser von 0,03...0,04 mm und die größte aufbringbare Drahtlänge werden Drahtwiderstände nur bis zu einem Wert von etwa 100 k Ω ausgeführt. Darüber hinaus beherrscht der Schichtwiderstand das Feld. Darunter tritt er besonders wegen der geringeren Baumaße mit dem Drahtwiderstand in Konkurrenz.

Als Widerstandsmaterial dienen metallische und nicht-metallische halbleitende Stoffe, wie Kohlenstoff, Silizium-

karbid, Bleisulfid, Gemische aus speziellen Metalloxyden u. a. Die am häufigsten für die Herstellung von Hochohmwiderständen verwendete Widerstandsmasse ist chemisch reiner Kohlenstoff in seinen zahllosen Modifikationen (beachte z. B. Diamant, Anthrazit, Retortenkohle, Grafit und Ruß). Je härter der Kohlenstoff, um so schlechter ist sein Leitvermögen. Der weiche Grafit ist daher ein relativ guter Leiter; Retortenkohle wiederum hat einen anderen Temperaturkoeffizienten als Ruß usw. Waren die ersten Massewiderstände, wie die Silitstäbe, noch inkonstant, so werden heute in der Radiotechnik sehr hohe Anforderungen an die Unabhängigkeit des Widerstandswertes von der angelegten Spannung, von der Temperatur, von der Luftfeuchtigkeit und vom Altern und weiterhin an die Rauschfreiheit des Widerstandes gestellt. Nach dem einen Herstellungsverfahren wird die Widerstandsmasse als kolloidale Kohlenstofflösung (Gemisch von leitenden Kohlenstoffteilchen mit einem nichtleitenden Lack) auf den Widerstandskörper aufgetragen und eingebrannt. Nach einem anderen Verfahren werden die hochohmigen Widerstände aus kristalliner Kohle hergestellt, die im Vakuum bei hoher Temperatur durch Zerlegung eines Kohlenwasserstoffes auf dem Widerstandsträger als Widerstandsschicht niedergeschlagen wird (Sublimation). Auch auf rein chemischem Wege lassen sich halbleitende Widerstandsschichten aufbauen. Kolloidale Metallschichten und solche aus Gemischen von Metalloxyden zeichnen sich durch hohe zeitliche Konstanz und kleinen Temperaturkoeffizienten aus.

Hochohmwiderstände mit zylindrischer Schicht werden heute im allgemeinen nur noch bis zu Nennwerten von 10 k Ω hergestellt. Darüber hinaus erhalten sie eine gewendelte Widerstandsschicht, die durch das Einschleifen einer gewendelten Nut in den keramischen Schichtträger entsteht. Diese Art der Herstellung gestattet es, durch gleichzeitige Messung den geforderten Ohmwert genau einzustellen.

Handelsübliche Schichtwiderstände (Festwiderstände) für die Nachrichtentechnik bis 20 W sind bei einer Oberflächengrenztemperatur von $t_{\max} = 110^{\circ} \text{C}$ (nach DIN 41 400 ist hierbei der

Widerstand bei einer Raumtemperatur von $t_0 = 20^\circ \text{C}$ waagrecht frei aufgehängt) in folgende Nenn- oder Dauerlastgruppen eingeteilt: $N_z = 0,25, 0,5, 1, 2, 3, 6, 10$ und 20 W . In Abhängigkeit von diesen Belastungswerten sind Abmessungen und Körperform der Widerstandsträger in DIN E 41 401 bis 41 408 genormt worden.

Als Widerstandswerte sind folgende zu bevorzugen:

Ω	10 100	12,5 125	16 160	20 200	25 250	30 300	40 400	50 500	60 600	80 800
$k\Omega$	1 10 100	1,25 12,5 125	1,6 16 160	2 20 200	2,5 25 250	3 30 300	4 40 400	5 50 500	6 60 600 ¹⁾	8 80 800
$M\Omega$	1	1,25	1,6	2	2,5	3	—	5	—	—

¹⁾ 700 $k\Omega$ als Gitterableitwiderstand vorläufig noch zugelassen und vereinheitlicht.

Für die Genauigkeit der Widerstandswerte werden hier 5 Klassen, nämlich 0,5, 2, 5, 7 und 15, unterschieden.

		Klasse	0,5	2	5	7	15
Auslieferungstoleranz = Abweicg. d. Widerstandswertes in % vom Nennwert bei Auslieferung vom Hersteller (Herstellungstoleranz, Bezugstemp. 20°C)		normal	± 1	± 5	± 10	± 10	± 20
		eingengt	—	± 2	± 5	± 5	± 10
zulässige Widerstandsänderung in % vom Istwert	nach 5000 stdg. Lagerung unbelastet bei 20°C und 60... 70 % relativer Luftfeuchtigkeit		$\pm 0,1$				
	nach 5000 stdg. Belastung mit der Nennlast (Klasse 0,5 nur mit $\frac{1}{2}$ Nennlast)		$\pm 0,4$	insg. ± 2	insg. ± 5	insg. ± 7	insg. ± 15
Temperaturbeiwert $\alpha \times 10^{-3} \Omega/^\circ \text{C}$ (Klasse 0,5, 2 u. 5 für jede Temperatur zw. -50 u. $+100^\circ \text{C}$, Klasse 7 Mittelwert zw. -50 u. $+100^\circ \text{C}$, Klasse 15 Mittelwert zw. $+10$ u. $+80^\circ \text{C}$.)		bis $1 \text{ M}\Omega$	0... $-0,5$	0... -1	0... -1	0... $-1,5$	0... -3
		über $1...3 \text{ M}\Omega$	0... $-0,5$	0... $-1,5$	0... $-1,5$	0... -2	0... -4
Zulässiges Eigengeräusch $\mu\text{V/V}$ Betriebsspannung			1	1	3	4	15

Im ungünstigsten Falle, wenn sich Auslieferungs-, Lagerungs- und Belastungstoleranz nach einer Seite voll auswirken, ist mit Abweichungen in der Größe $\pm 0,5, \pm 4, \pm 10$,

± 12 und ± 25 % vom Nennwert bei den eingeeengten Klassen und in Höhe von $\pm 1,5$, ± 7 , ± 15 , ± 17 und ± 35 % vom Nennwert bei den normalen Klassen zu rechnen. Hinzu kommt noch die Widerstandsänderung durch den Temperatureinfluß.

Für den Einsatz der Schichtwiderstände ist zu beachten, daß die Nennlast und damit die Oberflächengrenztemperatur im Betrieb nicht überschritten werden dürfen und daß weiterhin die Gleichung (8) für die zulässige Spannung U_z nur bedingt gilt, solange nämlich, als die folgenden Höchstspannungswerte U_{zmax} nicht überschritten werden:

Nennlast W	0,25	0,5	1	2	3	6	10	20
Höchstzulässige Betriebsdauerspannung U_{zmax} (effektive Wechselfspannung)	V 500 ^{*)}	V 750 ^{*)}	V 750	V 1000	V 1500	V 1500	V 5000	V 10000

*) Für Klasse 15 jedoch nur 350 V.

Die Höchstspannungswerte sollen einen Spannungsüberschlag, z. B. bei gewendelten Widerständen zwischen den Windungen der Widerstandswindel über den Rillenzwischenraum hinweg, vermeiden, der zur Zerstörung des Widerstandes führen würde. Ist nämlich der Spannungsabfall an der Länge der Widerstandsschicht zu hoch, so entstehen zunächst über die trennende Isolationsschicht hinweg Kriechströme und später, wenn hierdurch genügend Schichtteilchen in den Rillenzwischenraum transportiert sind, durch leitende Kohlewege und Funken ein Überschlag. Jedoch schon vor der Zerstörung des Widerstandes sinkt hierdurch sein Gesamtwiderstand und steigt in gleichem Maße der Strom, so daß der Widerstand auch schließlich durch Überlastung zerstört wird. Die Überlastbarkeit fester Schichtwiderstände wird nach DIN 41 400 bei einer max. Prüfspannung von 2 000 V 1 Sekunde lang mit einer Stoßlast = 25fache Nennlast (Klasse 0,5 nur $\frac{1}{2}$ Stoßlast) oder mit einer Überlast = 2fache Nennlast (Klasse 0,5 nur $\frac{1}{2}$ Überlast) 1 Minute lang geprüft.

Widerstände mit eingeeengten Auslieferungstoleranzen sollen nur in technisch notwendigen Fällen Verwendung finden und Widerstände der Klasse 0,5 dürfen aus Gründen

einer Konstanz des Widerstandswertes nur mit halber Nennlast belastet werden. Werden nämlich Widerstände in bestimmten kritischen Schaltungen, ferner zu Vergleichs- und Meßzwecken gebraucht, wo sowohl an die Genauigkeit als auch an die zeitliche Konstanz des Widerstandswertes besonders hohe Anforderungen gestellt werden, so erhält die Forderung, mit der Betriebslast möglichst weit unterhalb der Nennlast zu bleiben, d. h. den Widerstand leistungsmäßig stark überzudimensionieren, besondere Bedeutung. Hierdurch wird dann nämlich die mit der Betriebszeit eintretende Abweichung durch Belastung vermieden, und es wirken sich dann nur die Auslieferungstoleranz und der unvermeidliche, aber ebenfalls verringerte Einfluß des Temperaturkoeffizienten auf den Widerstandswert aus.

Für die Ermittlung einer unbekanntenen Wattbelastung aus den Abmessungen eines Schichtwiderstandes kann folgender spezifischer Belastungswert dienen:

Kohle-Schicht-Widerstände auf keramischen Trägern:

$$t_{\max} = 75^{\circ} \text{C bis } 110^{\circ} \text{C, } N_z' = 0,222 \text{ bis } 0,35 \text{ W/cm}^2.$$

Hierbei ist jedoch zu beachten, daß gewendelte Schichtwiderstände gleicher Längen- und Durchmessermaße, aber verschiedener Ohmwerte unterschiedliche Belastbarkeit besitzen. Der Grund hierfür ist die mit dem Widerstandswert veränderliche Wendelbreite und -steigung. Während nämlich bei niedrigen Ohmwerten Wendelbreite und -steigung groß werden, sind beide bei hohen Ohmwerten gering. Der gewendelte Widerstandsstreifen besitzt daher in der Abwicklung bei kleinen Ohmwerten je Längeneinheit eine große, dagegen bei hohen Ohmwerten eine kleine Wärmeabstrahlungsoberfläche.

Beispiel 9: Es ist die Wattbelastung eines Kohleschichtwiderstandes mit den Abmessungen: Rohrdurchmesser $D = 7 \text{ mm}$ und freie Widerstandslänge zwischen den Anschlußkappen $L_w = 20 \text{ mm}$, zu ermitteln.

Die Wärmeabstrahlungsoberfläche des Widerstandes ist

$$F = D \cdot \pi \cdot L_w = 0,7 \cdot 3,14 \cdot 2 = 4,5 \text{ cm}^2.$$

Mit Gleichung (6+7) wird dann die zulässige Belastung

$$N_z = F \cdot N_z' = 4,5 \cdot 0,222 = 1 \text{ W.}$$

Beispiel 10: Es sind die weiteren Abmessungen eines Hochohmwiderstandes mit gewendelter Schicht für den Nennwert $R_g = 1 \text{ M}\Omega$ unter Verwendung der im Beispiel 9 gegebenen Daten zu ermitteln.

Ein zylindrischer Schichtwiderstand mit einer Schichtstärke $s = 10^{-3} \text{ mm}$ und einem spezifischen Widerstand $\rho = 10^3 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ für Spezialkohle würde einen Querschnitt $q = (D/2 + s)^2 \cdot \pi - D^2 \cdot \pi/4 = 0,022 \text{ mm}^2$ und einen Widerstandswert von nur

$$R_g = \frac{\rho \cdot L_w}{q} = \frac{10^3 \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{0,022} = 1 \text{ 000 Ohm}$$

besitzen. Durch Einschleif einer Spirale, d. i. Verkleinerung von q und Vergrößerung von L_w , soll dieser Widerstand auf den Wert von $R_g = 1 \text{ M}\Omega$ eingestellt werden. Gemäß

$$q/R_g = q/L_g = 10^3/10^6 = 1/10^3$$

wird das Verhältnis zwischen Wendelquerschnitt q in mm^2 und Wendellänge L_g in m ermittelt, mit dem man unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden freien Widerstandslänge L_w einen Anhalt für die Steigung der Wendel erhält. Wählt man diese mit $h = 1 \text{ mm}$, so wird aus

$$\text{tg} \alpha = \frac{h}{D \cdot \pi} = \frac{1}{7 \cdot \pi} = 0,0455 \text{ der Steigungswinkel } \alpha = 2^\circ 36'.$$

Die Länge einer Wendelwindung beträgt dann

$$L_g' = \frac{h}{\sin \alpha} = \frac{1}{0,0455} = 22 \text{ mm}$$

und auf der freien Widerstandslänge $L_w = 20 \text{ mm}$ lassen sich $L_w/h = 20$ Windungen mit einer Gesamtlänge von

$$L_g = 22 \cdot 20 = 440 \text{ mm} = 0,44 \text{ m}$$

unterbringen. Der Wendelquerschnitt wird dann

$$q = L_g/10^3 = 0,44/10^3 = 0,00044 \text{ mm}^2$$

und die Wendelbreite bei einer Schichtstärke $s = 10^{-3} \text{ mm}$

$$b = q/s = 0,00044/10^{-3} = 0,44 \text{ mm.}$$

Die Breite der eingeschleiften Trennungsnut ist dann

$$a = h - b = 1 - 0,44 = 0,56 \text{ mm.}$$

Da die Schichtstärke s fertigungstechnischen Schwankungen unterliegt, gelten diese Werte nur als Richtwerte. Zum Ausgleich dieser Unterschiede wird in der Länge L_w ein genügender, durch Erfahrung gefundener Spielraum vorgesehen, damit unter laufender elektrischer Widerstandskontrolle solange geschliffen werden kann, bis sich der geforderte Widerstandswert einstellt.

6. Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen und die Spannungsteilung

Bei der *Reihen- oder Serienschaltung* von Widerständen nach Bild 5 ist der Gesamtwiderstand gleich der Summe der

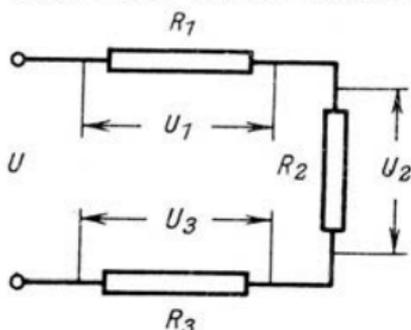


Bild 5. Reihenschaltung von Widerständen

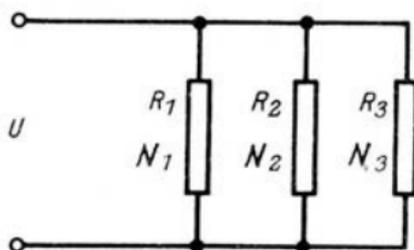


Bild 6. Nebeneinanderschaltung von Widerständen

Einzelwiderstände (Reihenwiderstände), d. i.

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

Die Klemmenspannung U wird hierbei im Verhältnis der Einzelwiderstände aufgeteilt. So wird

$$U_1 = U \cdot \frac{R_1}{R}, \quad U_2 = U \cdot \frac{R_2}{R}, \quad U_3 = U \cdot \frac{R_3}{R} \quad \text{usw.}$$

und die Klemmenspannung ist gleich der Summe der Spannungsabfälle, nämlich

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$$

Von einer solchen Aufteilung der Klemmenspannung U und damit des Widerstandes R durch Einzelwiderstände macht man häufig dann Gebrauch, wenn man vorhandene Widerstände an höheren Spannungen als der zulässigen Betriebsspannung verwenden will.

Bei der *Nebeneinander- oder Parallelschaltung* von Widerständen nach **Bild 6** ergibt sich der Gesamtwiderstand aus der Summe der Leitwerte

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

bei zwei parallelgeschalteten Widerständen mit

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (15a)$$

bei drei parallelgeschalteten Widerständen mit

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3} \quad (15b)$$

bei vier parallelgeschalteten Widerständen mit

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4}{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_2 \cdot R_4 + R_1 \cdot R_3 \cdot R_4 + R_2 \cdot R_3 \cdot R_4} \quad (15c)$$

Der Gesamtwiderstand R wird hierbei stets kleiner als der kleinste Einzelwiderstand.

Werden mehrere gleiche Widerstände parallel geschaltet, so daß also $R_1 = R_2 = R_3 = \dots R_n$, so gehen die Gleichungen (15 a, b und c) in die einfachere Form

$$R = \frac{R_1}{n} \quad (15d)$$

über, worin $n =$ Anzahl der Widerstände ist.

Von einer Aufteilung eines Widerstandes R in Zweigwiderstände macht man häufig dann Gebrauch, wenn man die Belastbarkeit steigern will, da sich die Gesamtbelastbarkeit aus der Summe der Einzelbelastungen zusammensetzt, nämlich

$$N = N_1 + N_2 + N_3 + \dots$$

Sucht man für die Aufteilung eines Widerstandes R in Parallelwiderstände zu einem vorhandenen Widerstand R_2 den passenden Widerstand R_1 , so ergibt sich dieser aus der umgeformten Gleichung (15 a) mit

$$R_1 = \frac{R \cdot R_2}{R_2 - R}$$

Beispiel 11: Es soll ein Schichtwiderstand $R = 1 \text{ M}\Omega$, 1 W., an einer Spannung $U = 1000 \text{ V}$ betrieben werden.

Die höchst zulässige Spannung ist lt. Tafel S. 39 für 1-Watt-Schichtwiderstände $U_{z\max} = U_1 = 750 \text{ V}$. Der entsprechende

Widerstand ergibt sich mit $R_1 = R \cdot U_1/U = 1 \cdot 750/1\,000 = 0,75\text{ M}\Omega$. Die nächst kleinere Normabmessung ist lt. Tafel S. 38 $R_1 = 0,6\text{ M}\Omega$. Der Widerstand R wird somit in $R = R_1 + R_2 = 0,6 + 0,4 = 1\text{ M}\Omega$ und die Spannung $U = 1\,000\text{ V}$ in $U_1 = U \cdot R_1/R = 1\,000 \cdot 0,6/1 = 600\text{ V}$ und $U_2 = U \cdot R_2/R = 1\,000 \cdot 0,4/1 = 400\text{ V}$ aufgeteilt. Die Belastung des Widerstandes R_1 beträgt dann $N_1 = U_1^2/R_1 = 0,6\text{ W}$ und diejenige von R_2 $N_2 = U_2^2/R_2 = 0,4\text{ W}$.

Beispiel 12: Es wird ein Widerstand $R = 27\text{ k}\Omega$, 3 W , benötigt. Da dieser nicht verfügbar ist, soll er durch Parallelschaltung mit einem vorhandenen Widerstand $R_2 = 60\text{ k}\Omega$, 2 W , gebildet werden. Gesucht wird R_1 .

$$R_1 = \frac{R \cdot R_2}{R_2 - R} = \frac{27 \cdot 60}{60 - 27} = 49\text{ k}\Omega.$$

Die Belastung von R_1 muß $N_1 = N - N_2 = 3 - 2 = 1\text{ W}$ betragen. Für Gleichung (15 a) und ihre Umformung nach R_1 läßt sich auch das *Nomogramm 4* verwenden. Verbindet man Punkt 60 ($\text{k}\Omega$) auf dem R_2 -Strahl mit dem Punkt 27 ($\text{k}\Omega$) auf dem R -Strahl durch eine Gerade, so trifft diese den R_1 -Strahl im Punkt 49 ($\text{k}\Omega$). Umgekehrt würde man so auch aus der Parallelschaltung von $R_1 = 49\text{ (k}\Omega)$ u. $R_2 = 60\text{ (k}\Omega)$ den resultierenden Widerstand $R = 27\text{ (k}\Omega)$ der Gleichung (15a) finden.

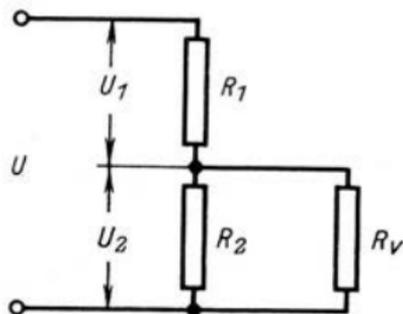
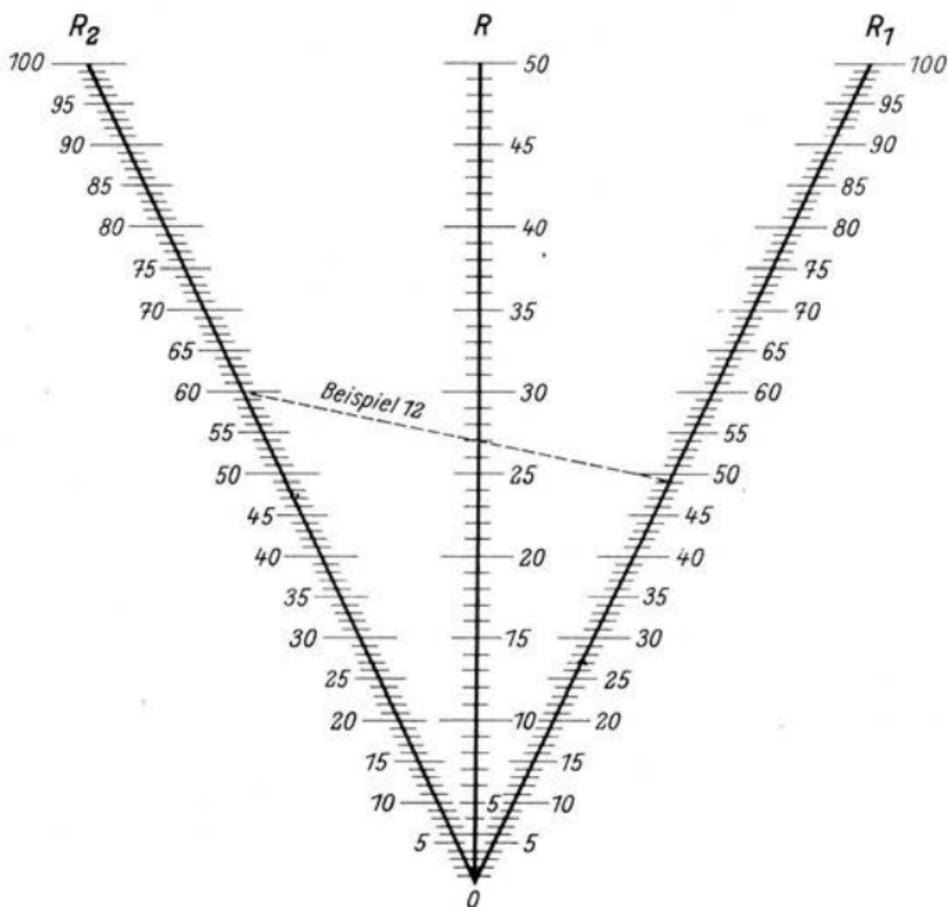


Bild 7. Spannungsteiler

Kommen in einem Stromkreis parallel- und seriengeschaltete Widerstände vor, so sind zur Vereinfachung der Berechnung zunächst die Gesamtwiderstände der Parallelschaltung nach Gleichung (15) zu ermitteln. Für die sich dann ergebende Serienschaltung ist der Gesamtwiderstand nach Gleichung (14) leicht zu finden.

Bei festen Spannungsteilerschaltungen nach Bild 7 ist häufig die Aufgabe zu lösen:



Nomogramm 4. Parallelschaltung zweier Widerstände
Erläuterung siehe Seite 44

a) bei bekannter Klemmenspannung U und festgelegter Abgriffsspannung U_2 , weiterhin bei bekanntem Verbrauchswiderstand R_v und Gesamtspannteilerwiderstand $R = R_1 + R_2$ die Teilwiderstände R_1 und R_2 zu bestimmen und

b) umgekehrt aus den bekannten Widerständen R_v , R_1 und R_2 und aus der bekannten Klemmenspannung U die Abgriffsspannung U_2 zu ermitteln.

Für den Fall a) gilt die Gleichung

$$R_2 = \frac{R}{2} - \frac{U}{U_2} \cdot \frac{R_v}{2} +$$

$$\sqrt{\left(\frac{U}{U_2} \cdot \frac{R_v}{2} - \frac{R}{2}\right)^2 + R \cdot R_v} \quad (16 a)$$

Sie geht bei $U_1 = U_2 = 1/2 U$ in folgende einfachere Form über:

$$R_2 = \frac{R}{2} - R_v + \sqrt{R_v^2 + \frac{R^2}{4}} \quad (16 \text{ b})$$

Für den Fall b) gilt die Gleichung

$$U_2 = U \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_v} + \frac{R_1}{R_2}} \quad (17)$$

Die Rechnung zeigt, daß z. B. $1/2 U$ keinesfalls bei $1/2 R$ abgegriffen wird, sondern, daß die Spannungsverteilung um so mehr von der linearen abweicht, je größer R gegenüber R_v wird.

Beispiel 13: Für einen Spannungsteiler, bei dem bekannt sind $R = 2\,000$ Ohm, $R_v = 100$ Ohm, $U = 220$ V und $U_2 = 110$ V, werden die Teilwiderstände R_1 und R_2 gesucht.

Nach Gleichung (16 b) ist

$$R_2 = \frac{2\,000}{2} - 100 + \sqrt{100^2 + \frac{2\,000^2}{4}} = 1\,905 \text{ Ohm.}$$

Damit wird dann weiterhin $R_1 = R - R_2 = 2\,000 - 1\,905 = 95$ Ohm. Als Gegenprobe muß im Hinblick auf $U_1 = U_2 = 110$ V die Parallelschaltung von R_2 und R_v den gleichen Wert wie R_1 ergeben. Nach Gleichung (15 a) ist

$$R_1 = \frac{R_2 \cdot R_v}{R_2 + R_v} = \frac{1\,905 \cdot 100}{1\,905 + 100} = 95 \text{ Ohm.}$$

Beispiel 14: Für einen anderen Spannungsteiler sind bekannt $U = 4,5$ V, $U_2 = 3$ V, $R = 400$ Ohm und $R_v = 2\,500$ Ohm, und gesucht werden R_1 und R_2 . In diesem Falle muß Gleichung (16 a) Anwendung finden

$$R_2 = \frac{400}{2} - \frac{4,5}{3} \cdot \frac{2\,500}{2} + \sqrt{\left(\frac{4,5}{3} \cdot \frac{2\,500}{2} - \frac{400}{2}\right)^2 + 400 \cdot 2\,500} = 276 \text{ Ohm}$$

Damit errechnet sich $R_1 = R - R_2 = 400 - 276 = 124 \text{ Ohm}$.

Beispiel 15: Für einen dritten Spannungsteiler sind gegeben $U = 120 \text{ V}$, $R = 500 \text{ V}$, $R_v = 25 \text{ Ohm}$ und $R_2 = 200 \text{ Ohm}$ und gesucht wird U_2 . Zunächst ist $R_1 = R - R_2 = 500 - 200 = 300 \text{ Ohm}$ und damit nach Gleichung (17)

$$U_2 = 120 \cdot \frac{1}{1 + \frac{300}{25} + \frac{300}{200}} = 8,3 \text{ V.}$$

7. Der Hochohmwiderstand im Hochfrequenzkreis

Im Hochfrequenz- (Hf-) Kreis sind grundsätzlich nur Schichtwiderstände verwendbar, da die kapazitiven und induktiven Einflüsse der Drahtwindungen die Verwendung des drahtgewickelten Widerstandes hier unmöglich machen.

Bei einem Hochohmwiderstand im Hf-Kreis sind neben den am Anfang des Abschnittes 5 angeführten Eigenschaften (zeitliche Konstanz des Widerstandswertes, kleiner Temperaturbeiwert usw.) der Wirkwiderstand und der Phasenwinkel (Verhältnis von Wirk- zu Blindwiderstand) von Bedeutung. Der Phasenwinkel der Schichtwiderstände ist kapazitiv (Spannung dem Strom in der Phase nachteilend) und durch die Parallelkapazität der Anschlußklemmen und die verteilte Raumkapazität der Widerstandsschicht bedingt. Unter der letzteren versteht man im Gegensatz zur konzentrierten Kapazität eines Kondensators eine Kapazität, die sich über die Länge einer Leitung verteilt, so daß also jeder Punkt der Leitung Kapazität besitzt. Bei gewendelten Widerständen macht sich im Ultrakurzwellengebiet auch die Selbstinduktion der Wendel wesentlich bemerkbar, deren Einfluß man dann durch einen mäanderbandförmigen Schliff der Wendel bei der Einstellung des Widerstandswertes möglichst gering zu halten sucht.

Größere Bedeutung als der Phasenwinkel besitzt der Wirkwiderstand R_w . Er soll eine möglichst große Frequenzunabhängigkeit besitzen. Bei entsprechend hohen Frequenzen beginnt jedoch R_w abzunehmen. Diese Abnahme ist vom konstruktiven Aufbau des Widerstandes abhängig und läßt sich

als Folge von frequenzabhängigen kapazitiven Widerständen ($R_c = 1/\omega C$) denken, die dem Gleichstromwiderstand R_g parallel geschaltet sind und eine um so größere Verminderung von R_w verursachen, je mehr sie sich dem ohmschen Nennwert des Widerstandes nähern, wie die Gleichung (15a) in der Form

$$R_w = \frac{R_g \cdot R_c}{R_g + R_c} = \frac{R_g}{1 + R_g/R_c} = \frac{R_c}{1 + R_c/R_g}$$

zeigt. Ist nämlich R_c sehr viel größer als R_g , d. i. R_g/R_c sehr viel kleiner als 1, so wird praktisch $R_w = R_g$ (erwünscht). Ist jedoch umgekehrt R_c sehr viel kleiner als R_g , d. i. R_c/R_g sehr viel kleiner als 1, so wird praktisch $R_w = R_c$ (unerwünscht). Nähern sich hierbei R_g und R_c in ihren Werten, so sinkt R_w bis zum Grenzwert $R_g = R_c$ auf $R_w = 1/2 R_g = 1/2 R_c$.

Der Einfluß des Hauteffektes ist bedeutungslos, da die Schichtstärke der üblichen Hochohmwiderstände nicht größer als 0,1 mm ist und die Eindringtiefe für Kohle bei 1000 MHz noch 0,1 mm beträgt.

Für den Einsatz der Hochohmwiderstände im Hf-Kreis ist es nun oft notwendig zu wissen, welchen Wirkwiderstand ein bestimmter Widerstand bei einer gegebenen Frequenz besitzt bzw. bei welcher Grenzfrequenz dieser Widerstand noch verwendbar ist, ohne einen zulässigen Wirkwiderstandsabfall zu überschreiten.

Ein *Hochohmwiderstand mit zylindrischer Schicht* läßt sich als kurzgeschlossene (in sich selbst geschlossene) Leitung mit konstantem Reihenwiderstand

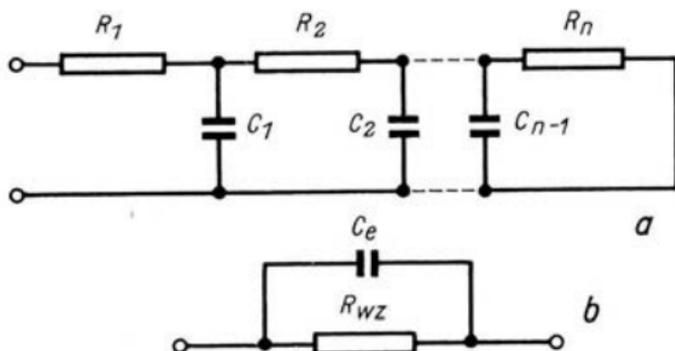
$$R_1 + R_2 + \dots + R_n = R_g$$

und konstanter Parallelkapazität

$$C_1 + C_2 + \dots + C_{n-1} = C_e$$

auffassen. **Bild 8a** zeigt die Darstellung und **Bild 8b** das Ersatzschaltbild, worin $R_{wz} =$ Hf-Wirkwiderstand für Widerstände mit zylindrischer Schicht und C_e die Raumkapazität ist. Besitzt der Widerstand *keine Anschlußklemmen*, so wird R_{wz} überwiegend durch die Raumkapazität der Widerstandsschicht selbst bedingt, die bei Hochohmwiderständen mit zylindrischer Schicht $C_e = 0,2 \dots 0,5$ pF beträgt, während bei

Bild 8.
Widerstand mit
verteilter
Raumkapazität



solchen mit Anschlußklemmen die Gesamtkapazität durch die hinzukommende Parallelkapazität der Klemmen auf etwa $C_e = 1 \dots 2 \text{ pF}$ steigt. Hierbei gilt folgende Beziehung für den kapazitiven Widerstand R_c

$$R_c = \frac{1}{\omega \cdot C_e} = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot f \text{ (MHz)} \cdot C_e \text{ (pF)}} \text{ in Ohm.}$$

Nach Messungen und Berechnungen von *Opitz* und *Klemt* (Dr. Rohde und Dr. Schwarz, München) gelten folgende Beziehungen für den Hf-Wirkwiderstand im Frequenzgebiet $f = 0,1 \dots 100 \text{ MHz}$:

a) Gültig für R_g kleiner als R_c :

$$R_{wz} = R_g \cdot (1 - 0,02 [R_g/R_c]^2) \quad (18a)$$

Bis zu Frequenzen, bei denen R_g kleiner als R_c ist, ist somit R_{wz} um den Betrag $0,02 (R_g/R_c)^2$ kleiner als R_g und die Verminderung von R_{wz} kleiner als 2% (im Falle $R_g = R_c$ ist sie 2%).

b) Gültig für R_g sehr viel größer als R_c :

$$R_{wz} = \sqrt{2 \cdot R_g \cdot R_c} \quad (18b)$$

Im Bereich höherer Frequenzen, in dem R_g sehr viel größer als R_c ist, nimmt R_{wz} mit $1/\sqrt{f}$ ab, da für einen bestimmten Widerstand alle übrigen Werte konstant sind.

Der günstigste Wert von $C_e = 0,2 \text{ pF}$ entspricht bei der höchsten Frequenz $f = 100 \text{ MHz}$ einem kapazitiven Widerstand

$$R_c = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_e} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 0,2} = 10 \text{ k}\Omega.$$

Wäre es möglich, die Raumkapazität $C_e = 0,2 \text{ pF}$ auch bei Einbau des Widerstandes in ein Gerät einzuhalten, wo sie sich jedoch durch gegenseitige Wirkung zwischen Widerstand und Umgebung meist vergrößert, so betrüge in diesem Ideal-falle nach Gleichung (18 a) die Verminderung von R_{wz} bei Widerständen mit einem R_g gleich oder kleiner $10 \text{ k}\Omega$ und bei Frequenzen gleich oder kleiner 100 MHz nicht mehr als 2% , d. h. R_{wz} bleibt über einen um so größeren Frequenzbereich konstant und stimmt daher mit R_g überein, je kleiner C_e ist. Das ist wiederum nur erreichbar, wenn man dem Widerstand möglichst kleine Abmessungen gibt. Für Widerstände mit Anschlußklemmen ist darüber hinaus ein möglichst kleines Verhältnis Widerstandsdurchmesser zu Widerstandslänge (D/L) anzustreben, wie folgende Gegenüberstellung von spezifischen Kapazitätswerten (Kapazität je Längeneinheit C_e' in pF/cm) zu Verhältniswerten D/L zeigt:

D/L	:	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
C_e' (pF/cm):		0,035	0,06	0,12	0,2	0,39	0,65	1,2	2

Dieser Verkleinerungstendenz wird jedoch durch den erforderlichen Leistungsverbrauch und die hierfür notwendige Wärmeabstrahlungsoberfläche eine Grenze gesetzt.

Bei *Widerständen mit gewendelter Schicht* liegen die Verhältnisse wesentlich anders. Gemäß **Bild 9 a** bestehen zwischen den einzelnen Wendeln die Querkapazitäten $C_1, C_2 \dots C_n$, mit denen die Querwiderstände $R_1, R_2 \dots R_n$ in Serie liegen. Die Querwiderstände $R_1 + R_2 + \dots R_n = R_q$ sind somit über die Querkapazitäten $1/C_1 + 1/C_2 + \dots 1/C_n = 1/C_q$ dem Gleichstromwiderstand R_g parallelgeschaltet (**Bild 9 b**). Der Verlustwiderstand R_{cq} setzt sich also hier aus Raum-, Quer- und Klemmenkapazität zusammen: Allgemein wirkt nun bekanntlich eine Serienschaltung von R und C wie eine ersatzweise Parallelschaltung von R' und C' , in der nun aber R' größer als R und C' kleiner als C geworden ist. So ergibt auch die Serienschaltung von C_q und R_q nach **Bild 9 b** im

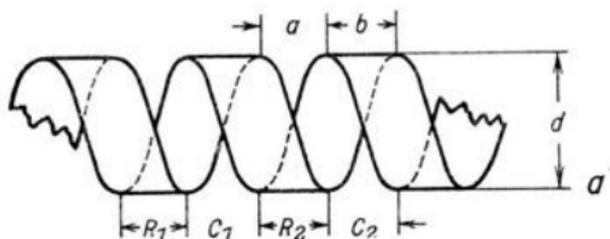
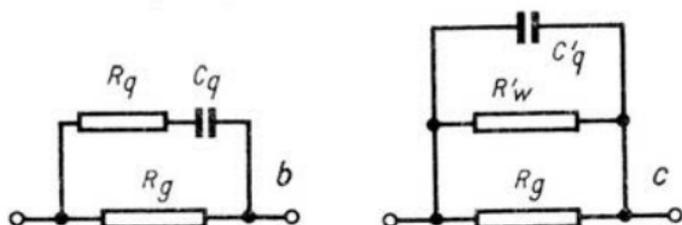


Bild 9.
Widerstand mit
gewendelter Schicht



Ersatzschaltbild 9c eine ersatzweise angenommene Parallelschaltung von R_q mit einer Ersatzkapazität C_q' . Setzt man für C_q' wieder den kapazitiven Widerstand

$$R_{cq} = \frac{1}{\omega \cdot C_q} = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot f \text{ (MHz)} \cdot C_q' \text{ (pF)}} \text{ in Ohm,}$$

so wird der Wirkwiderstand R_w' der Parallelschaltung von R_q und C_q' nach Opitz und Klemt

$$R_w' = \frac{R_{cq}^2}{R_q} \quad (19)$$

Diese Gleichung gilt jedoch nur, wenn R_{cq}^2 sehr viel kleiner als R_q^2 ist. Bei der heutigen Bauweise der Widerstände mit gewendelten Widerstandsschichten ist diese Voraussetzung jedoch in folgenden Bereichen erfüllt:

bei R_g gleich oder kleiner $1 \text{ M}\Omega$ für Frequenzen gleich oder kleiner $f = 10 \text{ MHz}$,

bei R_g gleich oder kleiner $100 \text{ k}\Omega$ für Frequenzen f gleich oder kleiner 100 MHz .

Weiterhin kann auch zur Vereinfachung in der Gleichung für R_{cq} an Stelle von $C_q' = C_q$ gesetzt werden, dessen Wert erfahrungsgemäß $C_q = 0,2$ bis $0,5 \text{ pF}$ beträgt.

Der Querwiderstand R_q errechnet sich nach *Opitz* und *Klemt* als Gleichstromwiderstand aus

$$R_q = R_g \cdot \frac{b^2}{\pi^2 \cdot d^2} \text{ in Ohm,} \quad (20)$$

worin bedeuten b = Wendelbreite in mm und
 d = Wendeldurchmesser in mm.

Hinzu kommt dann noch der Einfluß der Raumkapazität der Widerstandsschicht, der mit Gleichung (18 a) bzw. (18 b) zu ermitteln ist, da R_{wz} , jedoch nur für die Raumkapazität C_c (0,2...0,5 pF) errechnet, nicht nur für zylindrische, sondern auch für jede andere Form der Widerstandsschicht gilt.

Der Hf-Wirkwiderstand R_{wg} einer gewendelten Widerstandsschicht ergibt sich dann aus einer Parallelschaltung von R_w' und R_{wz} zu

$$R_{wg} = \frac{R_w' \cdot R_{wz}}{R_w' + R_{wz}} \text{ in Ohm.} \quad (21)$$

Soll R_{wg} auch bei hohen Frequenzen mit dem Gleichstromwiderstand R_g übereinstimmen, so müssen Querwiderstand R_q und Querkapazitäten C_q klein gehalten werden. Das ist erreichbar

für R_q : durch schmale Wendelbreiten b (entsprechend einer Verkleinerung der Länge l des Widerstandes gemäß Gleichung [1]),

für C_q : a) durch einen kleinen Wendeldurchmesser d (entsprechend einer Verkleinerung der Kondensatorfläche F gemäß der allgemeinen Kondensatorgleichung $C = F \cdot \varepsilon / 4 \cdot \pi \cdot a$),

b) durch große Wendelabstände a (entsprechend einer Vergrößerung der Stärke a des Dielektrikums in der gleichen Kondensatorgleichung für C),

c) durch große Wendelanzahl z bzw. geringe Wendelsteigung h (entsprechend einer Kapazitätsverringerung durch verstärkte Serienschaltung von Kondensatoren gemäß $1/C_q = 1/C_1 + 1/C_2 + \dots$).

Um zu erreichen, daß ein Hochohmwiderstand auch noch bei hohen Frequenzen einen seinem Nennwert entsprechenden

Wirkwiderstand besitzt, muß somit darauf geachtet werden, daß diese Baugrundsätze berücksichtigt wurden. Normale handelsübliche Hochohmwiderstände haben nämlich nur Schichtstärken von 0,001 bis 0,1 mm, so daß zur Erzielung auch hoher Widerstandswerte nur wenige Wendel notwendig sind. Infolge der dann größeren Wendelbreite b erhöht sich aber der Querkwiderstand R_q und infolge der geringeren Wendelanzahl z die Querkapazität C_q .

Im Gegensatz zu Widerständen mit zylindrischer Widerstandsschicht, die einen Nennwert von 10 k Ω im allgemeinen nicht übersteigen, kann bei gewendelten Widerständen, die vorzugsweise für höhere Widerstandswerte hergestellt werden, der Einfluß der im Widerstandsträger und im Schutzlacküberzug entstehenden dielektrischen Verluste auf den Hf-Wirkwiderstand nicht vernachlässigt werden. Nimmt man z. B. für einen keramischen Widerstandsträger und die Schutzlackschicht einen mittleren Verlustfaktor $\text{tg}\delta = 1 \cdot 10^{-3}$ bei 100 MHz und für die Klemmenkapazität einen Wert von 2 pF an, so ergibt sich ein parallel geschalteter Verlustwiderstand von 800 k Ω , der sich bei Wirkwiderständen R_{wg} gleich oder größer 50 k Ω bereits bemerkbar macht.

Beispiel 16: Es ist der Hf-Wirkwiderstand eines gewendelten Hochohmwiderstandes ohne Klemmen mit den Abmessungen des Beispieles (10) ($R_g = 1 \text{ M}\Omega$) bei einer Frequenz $f = 10 \text{ MHz}$ zu ermitteln.

Angenommen werden die Querkapazität $C_q = 0,2 \text{ pF}$ und die Raumkapazität $C_e = 0,2 \text{ pF}$. Es errechnen sich dann folgende Werte:

Nach Gleichung (20):

$$R_q = R_g \cdot \frac{b^2}{\pi^2 \cdot d^2} = 10^6 \cdot \frac{0,44^2}{3,14^2 \cdot 7^2} = 4 \cdot 10^2 \text{ Ohm.}$$

$$R_{cq} = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_q} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 0,2} = 8,3 \cdot 10^4 \text{ Ohm.}$$

$R_{cq}^2 = 6,9 \cdot 10^9$ ist also sehr viel größer als $R_q^2 = 16 \cdot 10^4 \text{ Ohm}$.

Nach Gleichung (19) ist weiterhin

$$R_w' = \frac{R_{cq}^2}{R_q} = \frac{6,9 \cdot 10^9}{4 \cdot 10^2} = 1,7 \cdot 10^7 \text{ Ohm}$$

und
$$R_c = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_e} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 0,2} = 8,5 \cdot 10^4 \text{ Ohm.}$$

Da $R_c = 8,5 \cdot 10^4$ sehr viel kleiner als $R_g = 1 \cdot 10^6$ Ohm ist, ist für die Errechnung von R_{wz} Gleichung (18b) anzuwenden, so daß

$$R_{wz} = \sqrt{2 \cdot R_g \cdot R_c} = \sqrt{2 \cdot 10^6 \cdot 8,5 \cdot 10^4} = 4,2 \cdot 10^5 \text{ Ohm.}$$

Damit wird mit Gleichung (21)

$$R_{wg} = \frac{R_w' \cdot R_{wz}}{R_w' + R_{wz}} = \frac{1,7 \cdot 10^7 \cdot 4,2 \cdot 10^5}{1,7 \cdot 10^7 + 4,2 \cdot 10^5} = \frac{4,1 \cdot 10^5 \text{ Ohm}}{= 0,41 \text{ M}\Omega}$$

Der Hf-Wirkwiderstand R_{wg} beträgt somit nur noch etwa 40 % des Gleichstromwiderstandes R_g .

8. Das Eigengeräusch der Widerstände

Das Eigengeräusch der Widerstände setzt sich aus mehreren sich überdeckenden Erscheinungen zusammen, nämlich

- a) einer dem Schroteffekt der Röhre ähnlichen Erscheinung, da der Strom sich atomistisch in Feldrichtung aus einzelnen durch den Übergang der einzelnen Elektronen als Ladungsträger (Elementarladung eines Elektrons $1,6 \cdot 10^{-19}$ As) bedingten Stromstößen zusammensetzt, die infolge geringer mittlerer Fortschritungsgeschwindigkeit verhältnismäßig lang sind, einander weit überschneiden und nur geringe Höhe besitzen,
- b) einer sich dieser Ungleichförmigkeit im Stromfluß überlagernden, durch den Temperatureinfluß auf die Leitungselektronen übertragenen Wärmebewegung mit dem Erfolg, daß die zeitliche Aufeinanderfolge der einzelnen Stromstöße nach a unregelmäßigen Schwankungen unterliegt,
- c) einer schwingenden Wärmebewegung der Ionen. Wie nämlich unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes Ladungen bewegt werden und ein Stromfluß entsteht, so entstehen umgekehrt elektromotorische Kräfte (Wärmerauschspannungen), wenn elektrische Ladungen mit ihren Trägern, den Atomen, Braunsche Wärmebewegungen ausführen.
- d) insbesondere bei Schichtwiderständen neben c (Wärmerauschen) vorwiegend einem ungleichmäßigen Stromübergang zwischen den kleinsten leitenden Teilchen und hiermit verbundenen Polarisationserscheinungen (Kontaktrauschen).

Diese Störursachen machen sich bei der Verstärkung kleiner Strom- und Spannungsänderungen bemerkbar und begrenzen den nutzbaren Verstärkungsgrad von Verstärkern.

Für b und c ist die Rauschleistung eines Widerstandes nach Nyquist

$$N_r = I_r^2 \cdot R = \frac{U_r^2}{R} = 4 \cdot K \cdot T \cdot \Delta f \text{ in W.} \quad (22)$$

Hierin bedeuten

$K = 1,37 \cdot 10^{-23} =$ Boltzmannsche Konstante in Ws^0/K ,

$T = 273 + t \text{ } ^\circ\text{C} =$ absolute Temperatur des Widerstandes
in $^\circ\text{K}$ (Kelvin),

$\Delta f =$ der vom Verstärker hindurchgelassene Frequenzbereich in Hz,

$R =$ Widerstandswert in Ohm.

Gleichung (22) zeigt, daß die Intensität der Schwankung mit der Wärmeenergie $K \cdot T$ und mit der Frequenzbandbreite Δf wächst, im übrigen aber unabhängig von der Lage des Frequenzbereiches ist. Ein solcher Wechselstrom aber, in dem alle Frequenzen gleichmäßig stark vertreten sind, gibt nach ausreichender Verstärkung ein „Rauschen“, in dem alle Frequenzen kleinerer Amplitude, ganz gleich welcher Frequenz, untergehen (Rauschpegel).

Aus Gleichung (22) ergeben sich noch der Rauschstrom und die Rauschspannung mit

$$I_r = \sqrt{\frac{4 \cdot K \cdot T \cdot \Delta f}{R}} \text{ in A} \quad (23a)$$

$$U_r = \sqrt{4 \cdot K \cdot T \cdot \Delta f \cdot R} \text{ in V} \quad (23b)$$

Beispiel 17: Es sind Rauschleistung und Rauschspannung eines metallischen Widerstandes $R = 1 \text{ M}\Omega$ im Frequenzbereich $\Delta f = 10 \text{ MHz}$ und bei einer Temperatur $t = 30^\circ \text{C}$ zu ermitteln.

Es ist zunächst $T = 273 + t = 273 + 30 = 303^\circ \text{K}$ und damit die Rauschleistung nach Gleichung (22)

$$N_r = 4 \cdot K \cdot T \cdot \Delta f = 4 \cdot 1,37 \cdot 10^{-23} \cdot 303 \cdot 10^7 = 16,6 \cdot 10^{-14} \text{ W}$$

und die Rauschspannung nach Gleichung (23b)

$$U_r = \sqrt{N_r \cdot R} = \sqrt{166 \cdot 10^{-14} \cdot 10^5} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ V} = 0,4 \text{ mV}$$
als unabänderliche naturbedingte Eigenschaft.

Während metallische Widerstände infolge der Beschränkung ihrer Rauschursache auf a und b und im Hinblick auf ihre meist niedrigen Ohmwerte kein störendes Eigengeräusch zeigen, macht sich dies bei nichtmetallischen Halbleiterwiderständen infolge Ursache c und vor allem d stärker bemerkbar. Außerdem trifft für sie die Strom- und Frequenzunabhängigkeit von U_r nicht zu. Aus der Erfahrung ist bekannt, daß U_r eines Verstärkers im Bereich der niedrigen Frequenzen (unterhalb etwa 1000 Hz) mit abnehmender Frequenz stark ansteigt. Harris gibt für einen 1-M Ω -Kohlewiderstand im Frequenzgebiet 10 bis 10 000 Hz bei $\Delta f = 1$ Hz, $t = 20^\circ \text{ C}$ und einer sehr geringen Strombelastung von 50 μA folgende Werte an (diese Angaben sind aber fabrikatbedingt):

10 000	1000	100	10	Hz
0,5	1,5	4,0	12,0	μV

Nach Gleichung (23b) betrüge die Rauschspannung dagegen nur $U_r = 0,126 \mu\text{V}$. Hieran ist erkennbar, wie erheblich sich schon geringe Gitterströme in der Anfangsstufe von Verstärkern auf das Eigenrauschen auswirken können, insbesondere, wenn als Gitterableitwiderstand Kohlewiderstände Verwendung finden. Im allgemeinen haben kristalline Kohleschichten bei Widerstandswerten bis etwa 1 M Ω geringe Rauschspannungen (bis etwa 0,5 $\mu\text{V/V}$), die aber mit wachsendem Widerstand stark zunehmen und schon bei 10 M Ω Werte von etwa 4 $\mu\text{V/V}$ erreichen. Kolloidale Kohleschichten dagegen haben bei geringeren Widerstandswerten relativ hohe Rauschspannungen, z. B. bei 1 M Ω etwa 2 $\mu\text{V/V}$, die jedoch mit wachsendem Widerstand nicht so stark ansteigen und bei 10 M Ω nur etwa 3 $\mu\text{V/V}$ erreichen. Bei Widerstandswerten bis 1 M Ω ist daher die kristalline und über 1 M Ω die kolloidale Schicht in dieser Beziehung günstiger.

Bei festen Schichtwiderständen für die Nachrichtentechnik ist die Rauschspannung gemäß DIN 41 400 durch zulässige spezifische Werte in μV pro V Betriebsspannung begrenzt worden (s. Aufstellung S. 38).

9. Genauigkeit von Meßwiderständen

Werden Widerstände zu Vergleichs- und Meßzwecken benötigt, so muß man sich vor Durchführung der Messung darüber klar werden, welche Genauigkeit für das Meßergebnis gefordert werden muß, und in Abhängigkeit davon das Meßverfahren und die Genauigkeit der Meßwiderstände festlegen. Hierbei soll folgende Übersicht behilflich sein:

1. Normale handelsübliche Widerstände, d. s. Schichtwiderstände der Klasse 0,5 oder Drahtwiderstände der Klasse 1 (Herstellungstoleranz $\pm 1\%$, Wattbelastung kleiner als $\frac{1}{2}$ Nennlast),
2. Ausgesuchte handelsübliche Widerstände der Gruppe 1 (Herstellungstoleranz $\pm 0,5\ldots 1\%$, Wattbelastung kleiner als $\frac{1}{3}$ Nennlast),
3. Normalwiderstände (Toleranz $\pm 0,1 \dots 0,2\%$, Belastung nach Maßgabe des Temperaturbeiwertes festlegen, gewöhnlich max. 0,1 A oder 5...10 W),
4. Präzisionswiderstände (Toleranz $\pm 0,05\%$, max. Belastung 1 W).

Austauschbare Vor- und Nebenwiderstände zur Veränderung des Meßbereiches von Meßgeräten dürfen nach DIN 57 410 folgende Genauigkeitswerte nicht überschreiten:

Klasse 0,1: $\pm 0,1\%$ vom Nennwert,

Klasse 0,2: $\pm 0,2\%$ vom Nennwert,

Klasse 0,5: $\pm 0,5\%$ vom Nennwert.

10. Kennzeichnung der Widerstände für die Nachrichtentechnik

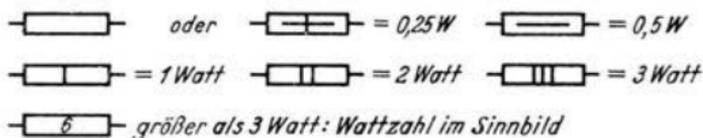
a) Zeichnungssinnbilder nach IFK.

Schaltzeichen für Fernmeldeanlagen sind genormt in DIN 40 700 Schaltzeichen und Pläne für Fernmeldeanlagen und
DIN 40 701 Geräte- und Anlagen-Kurzzeichen zu DIN 40 700.

Tafel 6. Kennzeichnung der Widerstände im Radiogerätebau.

A. Zeichnungssinnbilder nach IFK

1. Belastungswerte durch Sinnbilder und Zahlen.



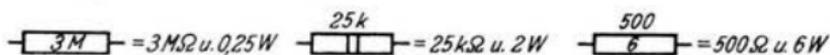
2. Widerstandswerte durch Zahlen oberhalb des Sinnbildes

Hierbei bedeuten auch z. B.: 50 = 50 Ω ; 10 k = 10 k Ω ; 25 M = 25 M Ω .

Ausnahme: 0,25 W Regel:

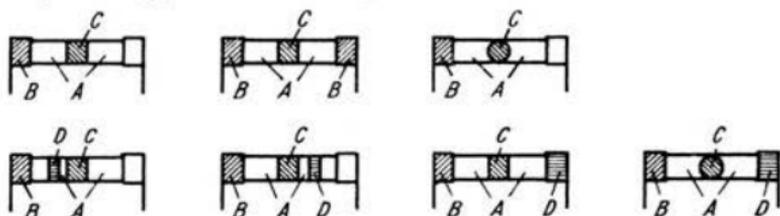
z. B.:

z. B.:

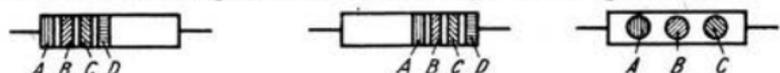


B. Farbkennzeichnung nach dem Standard-RMA-Code:

1. Körper-Kappe-Anordnung:



2. Hintereinandergestellte Farbring oder -punkte:



3. Farbschlüssel.

Farbe auf	A 1. Ziffer	B 2. Ziffer	C Dezimale	D Toleranz
schwarz	0	0	,0	
braun	1	1	0,	
rot	2	2	00,	
orange	3	3	000,	
gelb	4	4	0000,	
grün	5	5	00000,	
blau	6	6	000000,	
violett	7	7		
grau	8	8		
weiß	9	9		
gold				$\pm 5\%$
silber				$\pm 10\%$
farblos				$\pm 20\%$ u>

Werte stets in Ohm

Beispiel 18:

A grün 5

B rot 2

C gelb 0.000

520.000 Ω

D silber $\pm 10\%$

58
 Körper
 Kappe
 Ring
 2. Ring
 3. Ring
 4. Ring

Da es sich jedoch hierin nur um Symbole grundsätzlicher Art handelt, werden häufig dort, wo auch gleichzeitig eine Größenangabe der Schaltelemente notwendig oder zweckmäßig ist (Schaltpläne für Reparaturzwecke, Konstruktionszeichnungen usw.), Zeichnungssinnbilder nach IFK verwendet. Belastungs- und Widerstandswerte von Widerständen werden hiernach, wie in Tafel 6 unter A gezeigt, durch bestimmte Sinnbilder und Zahlen gekennzeichnet.

b) Feste Schichtwiderstände bis 20 W und feste Drahtwiderstände bis 50 W für die Nachrichtentechnik werden nach DIN 41 400 bzw. 41 410 mit Bezeichnungen für den Widerstandswert, die Klasse, die Auslieferungstoleranz usw. versehen. Dort befinden sich auch Beispiele für eine bestellmäßige Kennzeichnung von Widerständen.

c) Der RMA-Farbencode

Widerstände in Geräten des Auslandes werden meist durch Farben gekennzeichnet. Hierbei dient der in den USA von der Radio Manufacturers Association (RMA) aufgestellte und genormte Farbencode. Er wird nicht nur von amerikanischen, sondern auch von vielen westeuropäischen und vereinzelt bereits auch schon von deutschen Firmen angewandt. Weiterhin findet man ihn auch oft in russischen Geräten, da sie häufig nicht nur mit amerikanischen Lizenzen, sondern auch mit amerikanischen Einzelteilen gebaut wurden.

Die Kennzeichnung durch Farben hat gegenüber der mit Zahlen gewisse Vorteile in der Serienfabrikation. So kann sich in einem Montagekasten für z. B. 1-k Ω -Widerstände leicht ein solcher von 2 oder 3 k Ω einschmuggeln, ohne daß es vom Arbeiter am Band bemerkt wird. Auch für die Kontrolle ist es schwer, Zahlenaufdrucke auf eingebauten Widerständen zu erkennen. Bei einer Farbkennzeichnung dagegen, die in ihrer Farbzusammenstellung jedem Widerstand einen bestimmten Wert zuordnet, sind Irrtümer leichter zu vermeiden.

Beim RMA-Farbencode ist sowohl die Farbe selbst als auch ihre Anbringungsstelle auf dem Widerstand für seine Kennzeichnung von Bedeutung. Während der Farbencode selbst

meist einheitlich angewendet wird, ist die Farbenanordnung z. T. unterschiedlich. Jedoch lassen sich hierbei grundsätzlich zwei Anordnungen unterscheiden:

1. *Körper — Kappe — Anordnung*, bei der bedeuten

- A Körper- oder Grundfarbe = 1. Ziffer des Widerstandswertes,
B Farbe der Kappe = 2. Ziffer des Widerstandswertes,
C Farbring oder Farbpunkt = Anzahl der O, die auf A oder in der Mitte des Körpers B folgen (Werte stets in Ohm),
D Ein weiterer Farbring nur in Gold oder Silber = Toleranz des Widerstandswertes ± 5 bzw. ± 10 %.

2. *Hintereinandergestellte Farbringe oder Farbpunkte*:

- A 1. Ring oder Punkt = 1. Ziffer des Widerstandswertes,
B 2. Ring oder Punkt = 2. Ziffer des Widerstandswertes,
C 3. Ring oder Punkt = Anzahl der O, die auf A oder B folgen (Werte stets in Ohm),
D 4. Ring oder Punkt nur in Gold oder Silber = Toleranz des Widerstandswertes ± 5 bzw. ± 10 %.

Die Körperfarbe ist in diesem Falle ohne Bedeutung.

Tafel 6, Abschnitt B, enthält den Farbschlüssel und für beide Fälle Kennzeichnungsbeispiele. Als Abweichungen und Besonderheiten sind jedoch zu beachten:

Zu 1:

Manchmal unterscheiden Firmen zwischen Masse- und Drahtwiderständen dadurch, daß sie bei den ersteren eine Kappe, bei den letzteren beide Kappen gleichmäßig färben.

Die Anbringung des Toleranzfarbringes ist nicht einheitlich, er wird sowohl auf der linken als auch auf der rechten Seite des in der Körpermitte befindlichen Farbringes oder -punktes, oft aber auch auf der zweiten Kappe angebracht.

Zu 2:

Die Reihenfolge der Farbringe beginnt teils an der Kappe, teils auf dem Körper.

Zu 1 und 2:

Die Lage des Toleranzringes, der nicht zu verwechseln ist, gibt die Möglichkeit, die jeweils vorliegende Kennzeichnungsart festzustellen. Vereinzelt ist der Toleranzring auch nur weiß oder gelb statt silbern oder golden. Toleranzen von 20 % und mehr werden nicht gekennzeichnet.

Kommt es vor, daß einzelne Ringe oder Punkte fehlen oder daß der Widerstand ganz einfarbig ist, so deckt sich in diesem Falle die Farbe des fehlenden Ringes oder Punktes mit der Körperfärbung, z. B.:

Körper rot 2	Widerstand rot
Kappe grün 5	mit grünem Ring
Körperring rot 00	
	<hr/>	
	2500	Ohm

Körper orange 3	
Kappe orange 3	Widerstand einfarbig orange
Körperring orange 000	
	<hr/>	
	33 000	Ohm

Befindet sich außer den bisher genannten vier Ringen noch ein weiterer auf dem Widerstand, wie das vielfach bei amerikanischen Typen zur Kennzeichnung der Belastbarkeit der Fall ist, so handelt es sich um firmeneigene Farbkennzeichnungen, deren Bedeutung nicht ohne weiteres erkennbar ist.

Auch ist die Farbkennzeichnung nicht mit dem RMA-Code zu verwechseln, die mehrere deutsche Firmen uneinheitlich nach einem firmeneigenen System meist zur zusätzlichen Kennzeichnung bereits mit Zahlenaufdruck für den Ohmwert und die Toleranz versehener Widerstände zur Kennzeichnung der Belastung vornehmen. Das Gleiche gilt für Spezialkennzeichnungen, wie z. B. von Widerständen zum Einsatz im UKW-Gebiet u. a.

In Europa hat sich der RMA-Farbencode nicht eingebürgert, und zwar dürften hierfür die folgenden Gründe maßgebend

sein: Die Anbringung der mehrfarbigen Lackierung ist teurer als die Aufstempelung eines Widerstandswertes. Außerdem muß man ständig einen Schlüssel zur Hand haben, denn man kann die Farben-Folge nicht ohne weiteres im Kopf haben, auch wenn sie sich an die Regenbogen-Farbenfolge anlehnt. Schließlich ist der Farbencode für Farbblinde und Farbschwache, die gar nicht so selten sind, schwierig anzuwenden; besonders bei Lampenlicht ist es nicht einfach, Orange von Gelb zu unterscheiden oder das Grau von einem schmutzigen Weiß oder einem verstaubten Schwarz zu trennen. Die jetzt in Deutschland neu entstandene Vereinheitlichungskommission hat deshalb den amerikanischen Farbencode nicht angenommen, sondern man befaßt sich mit der folgenden Verbesserung:

Am besten erscheint nach wie vor die Wertstempelung; trotzdem kann es passieren, daß $5\text{ k}\Omega$ und $50\text{ k}\Omega$ verwechselt werden. Es wird daher vorgeschlagen, die Grundfarbe des Widerstandes nach der Größenordnung des Widerstandswertes zu ändern, so daß z. B. ein gelber Widerstand in die 10^4 -Gruppe (Zehntausender-Gruppe) gehört usw. Wenn es sich hier auch erst um einen Vorschlag handelt, so scheint dieser doch sehr der Beachtung wert, und es wäre wünschenswert, wenn er zur Einführung käme.

Abschließend sei noch auf folgende, z.Z. noch in der Weiterentwicklung befindliche Widerstandsausführungsarten hingewiesen:

Während sich bei kleinen Widerstandswerten Genauigkeitswiderstände ohne Schwierigkeiten aus Widerstandsdraht mit einem entsprechend geringen Temperaturbeiwert herstellen lassen, ist auch seit längerem versucht worden, dieses Ziel bei Schichtwiderständen mit höheren Widerstandswerten zu erreichen. Kolloidale Kohleschichten, die infolge ihrer organischen Natur gegen Feuchtigkeit, Austrocknung und hohe Belastung empfindlich sind und daher zur Güteklasse 7 und 15 (Tafel auf Seite 38) rechnen, sind hierfür nicht geeignet und die homogene und sehr harte kristalline Glanzkohleschicht (Güteklasse 0,5, 2 und 5) erreicht nur einen Temperaturbeiwert von $0,2 \dots 0,5 \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$. Durch Entwicklung des Borkarbonwiderstandes (kristalline Schicht mit Borzusatz) ist es vor kurzem gelungen, den Temperaturbeiwert auf $0,1 \dots 0,17 \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$

(etwa dem Wert von Chrom-Nickel-Drähten) zu senken. Solche Widerstände werden jedoch bisher nur im Bereich $10 \Omega \dots 0,5 \text{ M}\Omega$ ($0,5 \text{ W}$) bei Toleranzen von 1, 2 und 5% hergestellt. Bei größeren Werten als $0,5 \text{ M}\Omega$ steigt der Temperaturkoeffizient wieder auf Werte, die nicht viel besser als die sorgfältig hergestellter normaler kristalliner Schichten sind. Borkarbonwiderstände müssen bei höheren Temperaturen als normale Glanzkohlenwiderstände gebrannt werden, sind hochgiftig und sehr oberflächenempfindlich. Schließlich sei noch darauf hingewiesen, daß bei sehr hohen Widerstandswerten über etwa $50 \dots 100 \text{ M}\Omega$ und $0,5 \text{ W}$ Belastbarkeit ausschließlich kolloidale Schichten in Anwendung sind, da hier die kristalline Schicht zu dünn und unstabil würde.

Die von früher her bekannten und aus preislichen Gründen wieder aufgegebenen Metallschichtwiderstände, bei denen durch Metallzerstäubung eine hauchdünne Metallschicht auf die Oberfläche eines Isolierkörpers aufgebracht und dieser zum Schutz gegen Oxydation in ein Glasrohr eingeschmolzen oder mit einem Lacküberzug versehen wurde, hat neuerdings für manche Verwendungszwecke wieder an Bedeutung gewonnen und befindet sich daher in der Weiterentwicklung. So werden auch seit kurzem wieder Kleinstwiderstände als Edelmetall-Schichtwiderstände ausgeführt, die sich insbesondere in Fernsehgeräten gut bewährt haben.

Verzeichnis der Tabellen und Nomogramme

Tafel 1.	Spezifischer Widerstand, Leitfähigkeit und Temperaturkoeffizient der reinen Metalle. Bezugstemperatur 18°C	8
Tafel 2.	Spezifischer Widerstand, Leitfähigkeit und Temperaturkoeffizient der wichtigsten Metall-Legierungen. Bezugstemperatur 20°C	9
Tafel 3a.	Eigenschaften metallischer Widerstandswerkstoffe: Kupfer-Legierungen	10
Tafel 3b.	Eigenschaften metallischer Widerstandswerkstoffe: Silber-Legierungen	12
Tafel 3c.	Eigenschaften metallischer Widerstandswerkstoffe: Chrom-Nickel- und Chrom-Eisen-Legierungen	14
Tafel 3d.	Spezifischer Widerstand, spezifischer Leitwert und Temperaturkoeffizient der älteren Widerstandslegierungen und Halbleiterwerkstoffe	16
Tafel 4.	Durchmesser der blanken und isolierten Widerstandsdrähte	30
Tafel 5.	Meterwiderstand der Widerstandsdrähte (Ω/m) in Gruppen zusammengefaßt bei mittlerem spezifischem Widerstand ϱ_m	32
Tafel 6.	Kennzeichnung der Widerstände im Radiogerätebau	58
Nomogramm 1.	Das Ohmsche Gesetz	7
Nomogramm 2.	Ermittlung des Meterwiderstandes	19
Nomogramm 3.	Beziehung zwischen Widerstand, Strom bzw. Spannung und Belastung	20
Nomogramm 4.	Parallelschaltung zweier Widerstände	45

Franzis-Fachbücher für Radio- und Fernsichttechnik

ING. OTTO LIMANN

Funktechnik ohne Ballast

Einführung in die Schaltungstechnik der Rundfunk- und UKW-Empfänger. Ca. 220 Seiten, 400 Bilder, 10 Tafeln, 3. Auflage 1955. Ganzleinen ca. 12 DM

DIPL.-ING. WILHELM HASSEL UND ING. ERWIN BLEICHER

Trafo-Handbuch

Handbuch der Netz- und Tonfrequenz-Transformatoren und Drosseln in Berechnung, Entwurf und Fertigung. 288 Seiten, 158 Bilder, 24 Tafeln, 1951. Kart. 18.80 DM, Halbleinen 19.80 DM

DR RUDOLF GOLDAMMER

Der Fernseh-Empfänger

Schaltungstechnik, Funktion und Service. Ca. 160 Seiten mit ca. 220 Bildern und 5 Tabellen, 2. Auflage 1955, Ganzleinen ca. 12 DM

ING. GERHARD HENNIG

Dauermagnettechnik

132 Seiten, 121 Bilder, 16 Tabellen, 1952. Kart. 12.60 DM, Halbleinen 15.80 DM

HELMUT SCHWEITZER

Röhrenmeßtechnik

192 Seiten, 118 Bilder, 1950. Kart. 12 DM, Halbleinen 15.80 DM

ING. HEINZ RICHTER

Hilfsbuch für Katodenstrahl-Oszillografie

220 Seiten, 176 Bilder, 79 Oszillogramme, 12 Tabellen, 2. Auflage 1955
Kart. 12 DM, Halbleinen 15.80 DM

HANS-JOACHIM SCHULTZE

Funktechnische Nomogramme

75 Tafeln in Mappe, 1950. Kart. 9 DM

ING. ERNST HANNAUSCH

Wie richte ich meine Radiowerkstatt ein?

52 Seiten, 17 Bilder, zahlreiche Tabellen, 1950. Kart. 5.50 DM

FRITZ KUNZE

Amerikanische Röhren

64 Seiten, 23 Tabellen, 70 Bilder, 422 Sockelschaltungen, 5. Auflage 1948.
Kart. 5.80 DM

Röhren-Taschen-Tabelle

144 Seiten mit vielen Sockelschaltungen, 5. Auflage 1955, Kart. 4.90 DM

RADIO-PRAKTIKER-BÜCHEREI

- Die U-Röhren-Reihe mit Außenkontaktsockel und ihre Schaltungen.** Von H. S u t a n e r. Mit 50 Bildern und Schaltungen. 2. Aufl. Nr. 1
- Die UKW-Röhren und ihre Schaltungen.** Nr. 2
Von Dr. A. R e n a r d y. Mit 66 Bildern und Schaltungen. 3. Aufl.
- UKW-FM-Rundfunk in Theorie und Praxis.** Von H. G. M e n d e. Mit 35 Bildern und 4 Tabellen. 4. und 5. Aufl. Nr. 3
- UKW-Empfang mit Zusatzgeräten.** Von H. G. M e n d e. Nr. 4
Mit 16 Bildern und 9 Tabellen. 4. Aufl.
- Superhets für UKW-FM-Empfang.** Von H. G. M e n d e. Nr. 5
Mit 21 Bildern und 1 Tabelle. 1. und 2. Aufl.
- Antennen für Rundfunk- und UKW-Empfang.** Von H. G. M e n d e. Nr. 6
Mit 30 Bildern und 7 Tabellen. 6. und 7. Aufl.
- Neuzeitliche Schallfolienaufnahme.** Von Ing. F. K ü h n e. Nr. 7
Mit 39 Bildern. 2. Aufl.
- Vielseitige Verstärkergeräte für Tonaufnahme und Wiedergabe.** Nr. 8
Von Ing. F. K ü h n e. Mit 36 Bildern. 6. Aufl.
- Magnetbandspieler-Praxis.** Von Ing. W. J u n g h a n s. Nr. 9
Mit 36 Bildern und 2 Tabellen. 4. Aufl.
- Magnetbandspieler-Selbstbau.** Von Ing. W. J u n g h a n s. Nr. 10/10a
Mit 102 Bildern. Doppelband. 5. Aufl.
- Mikrofone, Aufbau, Verwendung und Selbstbau.** Von F. K ü h n e. Nr. 11
Mit 38 Bildern und 2 Tabellen. 3. Aufl.
- Röhrenmeßgeräte in Entwurf u. Aufbau.** Von H. S c h w e i t z e r. Nr. 12
Mit 52 Bildern. 1. und 2. Aufl.
- Schliche und Kniffe für Radiopraktiker.** Von F. K ü h n e. Nr. 13
Mit 57 Bildern. 5. und 6. Aufl.
- Geheimnisse der Wellenlängen.** Mit 49 Bildern und 20 Tabellen und Tafeln. Von G. B ü s c h e r. Nr. 14
- Moderne Zweikreisempfänger.** Von H. S u t a n e r. Nr. 15
Mit 43 Bildern und Schaltungen. 4. und 5. Aufl.
- Widerstandskunde für Radiopraktiker.** Von G. H o f f m e i s t e r. Nr. 16
Mit 9 Bildern, 4 Nomogrammen u. 6 großen Zahlentafeln. 2. Aufl.
- Prüfsender für UKW-Empfänger. UKW-Meßgeräte Teil I.** Nr. 17
Von Dipl.-Ing. R. S c h i f f e l u. Ing. F. W o l e t z. 57 Bilder. 3. Aufl.
- Radio-Röhren. Wie sie wurden, was sie leisten und anderes, was nicht im Barkhausen steht.** Von H. G. M e n d e. Nr. 18/19
Mit 65 Bildern. Doppelband. 2. Aufl.
- Methodische Fehlersuche in Rundfunkempfängern.** Nr. 20
Von Dr. A. R e n a r d y. Mit 16 Bildern. 4. und 5. Aufl.
- Funktechniker lernen Formelrechnen auf kurzweilige, launige Art.** Von F. K u n z e. Band I. Mit 22 Bildern. 3. Aufl. Band II s. Nr. 42. Nr. 21
- Lehrgang Radiotechnik.** Von F. J a c o b s.
- Teil I. Mit 132 Bildern u. 3 Tabellen. Doppelband. 4. Aufl. * Nr. 22/23
Teil II. Mit 88 Bildern. Doppelband. 3. Aufl. * Nr. 24/25
- Tonstudio-Praxis.** Von F. K ü h n e. Mit 36 Bildern u. 6 Tab. Nr. 26
- Rundfunkempfang ohne Röhren. Vom Detektor zum Transistor.** Von H. G. M e n d e. Mit 94 Bildern. Doppelband. 4. Aufl. Nr. 27/27a

- Die Glimmröhre und ihre Schaltungen.** Von O. P. Herrnkind
Mit 88 Bildern. 3. Aufl. Nr. 28
- Kleines ABC der Elektroakustik.** Von G. Büscher Nr. 29/30
Mit 120 Bildern und 40 Tabellen. **Doppelband. 2. Aufl.**
- Sender-Baubuch für Kurzwellen-Amateure.** Von Ing. H. F. Steinhäuser. Mit 56 Bildern. **Doppelband. 4. Aufl.** Nr. 31/32
- Röhrenvoltmeter.** Von Ing. O. Limann Mit 60 Bildern. 2. Aufl. Nr. 33
- Einzelteilprüfung.** Von O. Limann Mit 42 Bildern. 3. Aufl. Nr. 34
- Wegbereiter der Funktechnik.** Von W. Möbus. Nr. 35
- Die Prüfung des Zwischenfrequenz-Verstärkers und Diskriminators beim UKW-Empfänger.** UKW-Meßgeräte Teil 2. 2. Aufl. Nr. 36
Von Dipl.-Ing. R. Schiffel und Ing. F. Wolletz. Mit 50 Bildern.
- Fehlersuche durch Signalverfolgung und Signalführung.** Nr. 37/38
Von Dr. A. Renardy. Mit 53 Bildern u. 3 Tabellen. **Doppelbd. 2. Aufl.**
- Die Fernsehröhren und ihre Schaltungen.** Von Ing. L. Ratheiser. Mit 77 Bildern, 25 Tabellen u. 41 Sockelschalt. **Doppelband.** Nr. 39/40
- Kurzwellenempfänger für Amateure.** Von W. Diefenbach. Mit 64 Bildern und Schaltungen. 2. und 3. Aufl. Nr. 41
- Funktechniker lernen Formelrechnen.** Band II. Von F. Kunze. Mit 19 Bildern. 1. und 2. Aufl. Band I siehe Nr. 21. Nr. 42
- Musikübertragungs-Anlagen.** Von F. Kühne. Mit 34 Bild. 2. Aufl. Nr. 43
- Kurzwellen-Amateurantennen für Sendung u. Empfang.** 3. Aufl. Von W. W. Diefenbach. Mit 76 Bildern und 8 Tabellen. Nr. 44
- UKW-Sender- und Empfänger-Baubuch für Amateure.** Von H. F. Steinhäuser. Mit 73 Bildern. **Doppelband. 1. Aufl.** Nr. 45/46
- Moderne Reiseempfänger.** Von H. Sutaner. Mit 48 Bild. 2. Aufl. Nr. 47
- Kleines Praktikum der Gegenkopplung.** Von H. G. Mende. Nr. 48
Mit 33 Bildern und 4 Tabellen. 1. Aufl.
- UKW-Hand-Sprechfunk-Baubuch.** Von H. F. Steinhäuser. Mit 45 Bildern. 1. und 2. Aufl. Nr. 49
- Praktischer Antennenbau.** Von H. G. Mende. Nr. 50
Mit 51 Bildern und 9 Tabellen. 3. Aufl.
- Fernseh-Bildfehler-Fibel.** Von O. P. Herrnkind. Nr. 51
Mit 50 Bildern. 2. Aufl.
- Kleine Fernsehempfangs-Praxis.** Von P. Marcus. Nr. 52/54
Mit 189 Bildern und 2 Tabellen. **Dreifachband. 2. Aufl.** *
- Fernsehtechnik von A bis Z.** Von K. E. Wackerl Nr. 55/56
Mit 52 Bildern und 6 Tabellen. **Doppelband. 2. Aufl.**
- Tönende Schrift.** Von H. Kluth. Mit 23 Bildern. 2. Aufl. Nr. 57
- Morselehrgang.** Von W. Diefenbach. Mit 18 Bildern. Nr. 58
- Funk-Entstörungs-Praxis.** Von H. G. Mende. Mit 43 Bildern. Nr. 59
- Die Widerstand-Kondensator-Schaltung.** Von R. Schneider. Mit 59 Bildern und 4 Tabellen. 2. Aufl. Nr. 60
- Nomogramme als Hilfsmittel für den Funktechniker.** Nr. 61
Von Ing. Otto Limann. Mit 42 Bildern.
- Englisch für Radio-Praktiker.** Nr. 62
Von Dipl.-Ing. W. Stellrecht u. Dipl.-Ing. P. Miram.

* Auch in Ganzleinen erhältlich.

Verzeichnis für Nr. 63 bis 79 siehe 2. Umschlagseite

F R A N Z I S - V E R L A G M Ü N C H E N