

Widerstände, Kondensatoren und Induktivitäten

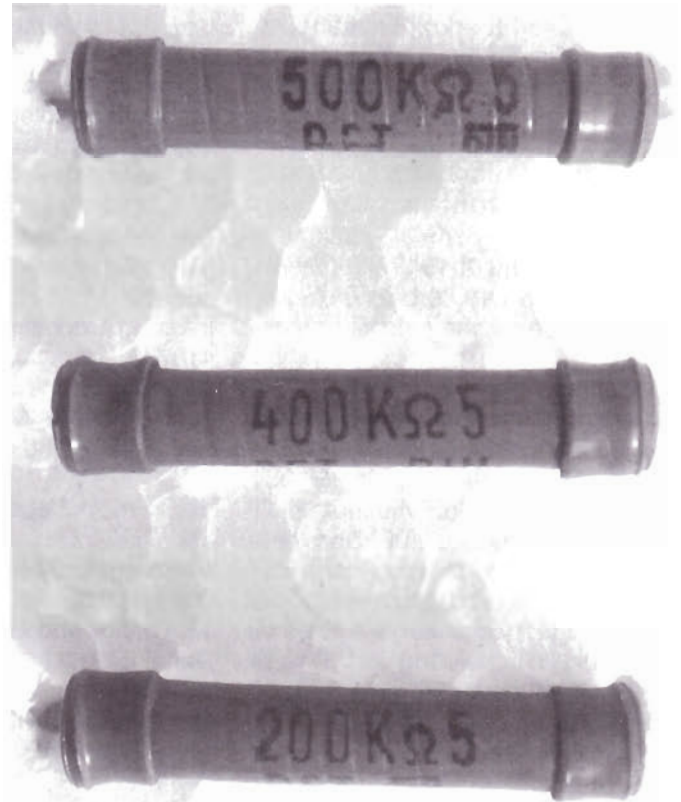
## Warum 470 k $\Omega$ statt 500 k $\Omega$ ?

Autor:  
Peter von Bechen  
85356 Freising  
Tel.: 08161 81899

Kürzlich fragte ein junger Sammlerkollege, warum die Widerstände in Radiogeräten bis in die 1950er-Jahre Werte beispielsweise von 200  $\Omega$ , 30 k $\Omega$  oder 500 k $\Omega$  hätten, in späteren Geräten aber 220  $\Omega$ , 33 k $\Omega$  oder 470 k $\Omega$ . Bei den Kapazitäts- und Induktivitätswerten wäre ihm das auch aufgefallen.

Nun, die „alten Hasen“ in der Elektroniker-Gemeinde wissen sicherlich die richtige Antwort auf diese Frage! Oder etwa nicht? Gut, deshalb hier für alle, die sich das nicht so recht erklären können oder sich noch keine Gedanken darüber gemacht haben, hier eine ausführliche Erklärung. Die „Wissenden“ dürfen diesen Beitrag einfach ignorieren.

Zunächst könnte man auf die Idee kommen, dass sich bis in die 1950er-Jahre die Bauelementeindustrie nicht viel Gedanken darüber gemacht und die Werteskala einfach nur linear unterteilt hat, d. h. es wurden Widerstände, Kondensatoren und Induktivitäten mit der Wertunterteilung von 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9 und deren dekadisches Vielfaches (10; 100; 1.000; 100.000; 1.000.000 usw.) produziert.



0,5-Watt-Widerstände nach DIN aus DDR-Produktion (RFT). Werte: 200 k $\Omega$ , 400 k $\Omega$ , 500 k $\Omega$ . Hier kann man die eingeschlifften Abgleichwendel erkennen.

### Herstellungsverfahren und Toleranzen

Das hört sich irgendwie naheliegend an, stimmt aber leider nicht. Wäre ja auch viel zu einfach. Zur näheren Erklärung muss man sich das damals schon übliche Herstellungsverfahren z.B. von Widerständen genauer ansehen (für Kondensatoren und Induktivitäten gilt in gewissem Maße ähnliches): Ein typischer Kleinleistungswiderstand besteht aus einem kleinen zylinderförmigen Keramikkörper, auf den eine Kohle- oder Metallschicht eingebrannt ist.

### CHARLES RENARD

Werteskalierung mit bevorzugten Zahlen auf Basis geometrischer Folgen erfand Col. CHARLES RENARD. (1847-1905). Der war Ingenieur beim französischen Militär und an der Konstruktion von lenkbaren Luftschiffen und Ballonen beteiligt. Für diese wurden jede Menge Seile und Tawe benötigt, die in den verschiedensten Stärken beschafft und auf Lager gehalten werden mussten. Weil das immer unübersichtlicher und unwirtschaftlicher wurde, dachte RENARD darüber nach, wie sich die jeweiligen Anforderungen mit weniger Seiltypen abdecken ließen. Er fand heraus, dass ein Seil nicht nur für eine spezielle Be-



lastung, sondern für einen Bereich der zulässigen Belastungen spezifiziert werden sollte und erfand das System der „bevorzugten Werte“, das keine lineare, sondern eine geometrische Teilung aufweist. Dieses entwickelte sich später zu dem internationalen Standard „ISO 3“ (DIN 323) weiter, auf dem letztendlich heute auch die Staffelung der Werte elektronischer Bauelemente basiert.

Das Ergebnis von RENARDS Überlegungen konnte sich übrigens sehen lassen: Beim französischen Militär wurde die Zahl der benötigten Seiltypen von 425 auf 17 reduziert.

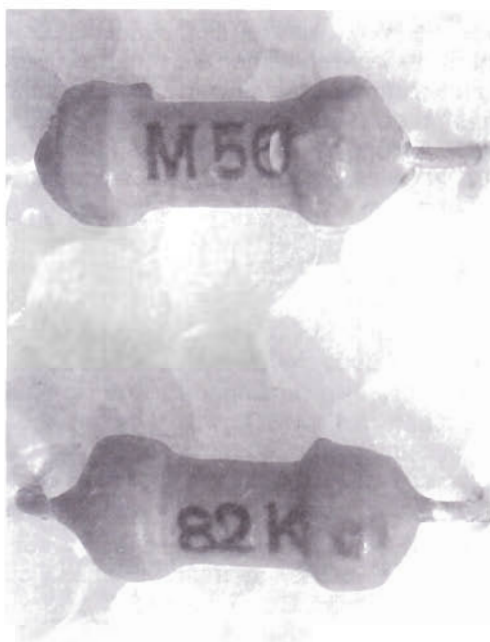


Bild links: Deutsche 0,25-W-Widerstände aus den 1950er-Jahren. Werte: 50 k $\Omega$ , 800 k $\Omega$ , 5 k $\Omega$ , 4 k $\Omega$ .

Bild Mitte: 0,25-W-Widerstände aus amerikanischer Produktion, Ende der 1940er-Jahre. Werte: 82 k $\Omega$  und 560 k $\Omega$  (M56 – soll heißen 0,56 M $\Omega$ )

Bild rechts: Es gab in den 1950er-Jahren in Deutschland auch Widerstände in radialer Bauform mit Werten der E12-Reihe. Werte: 39  $\Omega$ , 330 k $\Omega$ , 1,8 M $\Omega$ .



Nach der Montage der Anschlusskappen rechts und links kann man zwischen ihnen den Widerstandswert messen. Dieser hängt unter anderem von der Art und Dicke des aufgebrannten Materials und von der Länge des Keramikkörpers ab. Im Rohzustand decken die Widerstandswerte der einzelnen Bauteile nur einen relativ schmalen Bereich ab. Deshalb wird die Beschichtung in einer Maschine spiralförmig eingefräst, so dass sich der Weg, den der Strom durch

das Bauelement nehmen muss, verlängert. Damit erhöht sich auch der Widerstandswert. Diese spiralförmigen Einkerbungen lassen sich auf älteren Widerstandsexemplaren gut erkennen.

Man kann sich gut vorstellen, dass dieser Produktionschritt mit größter Präzision erfolgen muss, denn die Bauelemente haben ja recht kleine Abmessungen (heute macht man das mit Lasern). Es wäre natürlich denkbar, dass man den Widerstandswert während des Fräsvorgangs misst und diesen dann beendet, wenn der gewünschte Wert erreicht ist. Aber das ist wohl zu aufwändig, und es ist einfacher, die Bauelemente danach zu messen und auszusortieren. Das kann weitgehend automatisch erfolgen, was durchaus wichtig ist, weil so ein Widerstand ja nur wenige Cent kosten soll.

Wenn die gewünschten Werte pro Dekade einfach linear unterteilt wären, also 1; 2; 3; 4...bis 9, dann könnte man zum Schluss die Bauelemente in eine Menge von Kästchen nach ihren Werten einsortieren.

Und was passiert mit den Zwischenwerten, die in der Produktion anfallen, z.B. 1,234, 7,659 oder 9,163? Ist das Ausschuss? Nein, falsch: Es gibt bei diesen Bauelementen ja auch noch eine Toleranzangabe! Üblich sind z. B. 10, 5, 2, 1 oder sogar 0,1 Prozent. Landläufig wird hier schon mal von „Genauigkeit“ gesprochen. Das sollte aber präziser formuliert werden: Wenn ein Bauelementewert eine „Genauigkeit“ von 10 Prozent hätte, wäre er 90 Prozent ungenau. Richtig ist: Die Toleranz, d.h. die maximale Abweichung vom Nennwert, des Bauelementes beträgt 10 Prozent, und zwar in beide Richtungen. Soll heißen: Ein Widerstand mit dem Nennwert von 1.000  $\Omega$  und einer Tole-



ranz von 10 % kann tatsächlich einen Wert zwischen 900 und 1.100 Ω aufweisen. Toleranzwerte werden immer als Prozentzahl, d. h. als Relativ- und nicht als Absolutwert angegeben. Beim Beispielwiderstand von 1.000 Ohm ist der Absolutwert der möglichen Abweichung +/-100 Ω. Bei einem 9.000-Ω-Widerstand mit 10 % Toleranz sind das absolut aber deutlich mehr, nämlich +/-900 Ω.

**Überlappungen der Toleranzbereiche**

Für das Aussortieren bedeutet das, dass auf den Kästchen nicht nur Nennwert steht, sondern auch der Bereich aller möglichen Werte, die sich aus der Toleranzangabe ergeben. In das Kästchen für den Nennwert 1.000 Ω / Toleranz 10 %, kommen demnach alle Bauelemente, bei denen ein Wert zwischen 900 und 1.100 Ω gemessen wurde usw.

Wenn man dieses Verfahren mit einer linearen Aufteilung der Nennwerte praktizieren wollte, bemerkte man schnell, dass es insbesondere in den oberen Bereichen weitgehende Überlappungen der absoluten Toleranzbereiche gibt. Beim Nennwert 8.000 Ω mit 10 Prozent Toleranz könnten die Werte zwischen 7.200 und 8.800 Ω liegen. In welches Kästchen gehört dann ein Widerstand mit gemessenen 8.500 Ω? In den für 9.000 oder 8.000 Ω? Die Toleranzbereiche beider Nennwerte decken diesen Wert ab. Man sieht: Das ist offensichtlich keine gute Lösung.

**Sinnvolle Werteabstufungen**

Nennwert	Toleranzbereich
1	0,90 - 1,10
1,2	1,08 - 1,32
1,5	1,35 - 1,65
1,8	1,62 - 1,98
2,2	1,98 - 2,42
2,7	2,43 - 2,97
3,3	2,97 - 3,63
3,9	3,51 - 4,29
4,7	4,23 - 5,17
5,6	5,04 - 6,16
6,8	6,12 - 7,48
8,2	7,38 - 9,02

Die Lösung ist eine Skala, in der die höheren Werte einen größeren Abstand zueinander haben. Mit ein wenig Rechnen kommt man schnell darauf, was gemeint ist: Bei 10 % Toleranz ergeben sich damit die in der Tabelle gezeigten sinnvollen Werteabstufungen.

Die hier noch vorhandenen kleinen Überdeckungen und Lücken in den Werten ergeben sich aus Rundungsfehlern (sie liegen im Hundertstelbereich und sind daher zu vernachlässigen).

Bei einer zulässigen Toleranz von 10 % decken diese 12 Nennwerte eine Dekade vollständig ab. Bei kleineren Toleranzen ergibt sich zwangsläufig eine größere Anzahl von Nennwerten, wenn der gesamte Bereich lückenlos abgedeckt werden soll. So sind es bei fünf Prozent schon 24 Werte, hingegen bei 20 Prozent nur sechs Werte. D. h., die jeweils nächst präzisere Werteabstufung ergibt sich mit Halbierung des Toleranzwertes, wobei sich die Anzahl der Nennwerte verdoppelt. Man spricht hier von „Reihen“, die genormt sind. Sie tragen die Bezeichnungen „E3“, „E6“, „E12“, „E24“... „E192“, und die Norm heißt „DIN IEC 60063“.

**Ein wenig Mathematik**

Für die Mathematiker unter den Lesern: Es handelt sich hier um sogenannte „Renard-Serien“ (siehe Kasten), die mit folgender mathematischen Folge beschrieben werden [1]:

$$k = \sqrt[n]{10^m}, m \in [0; n] \cap \mathbb{Z}, n = \text{E-Reihe}$$

Beispiel: die Reihe E3, die aus drei Werten pro Dekade besteht. Hier besteht m aus der Zahlenmenge 1, 2, 3 Die Werte berechnen sich dann folgendermaßen:

Der erste Widerstandswert  $m = 0 : R = \sqrt[3]{10^0} = 1,0$   
 Der zweite Widerstandswert  $m = 1 : R = \sqrt[3]{10^1} = 2,2$   
 Der dritte Widerstandswert  $m = 2 : R = \sqrt[3]{10^2} = 4,7$

**Quellen:**

- [1] E-Reihe. <http://de.wikipedia.org/wiki/E-Reihe> (Oktober 2012)
- [2] Kunze, F.: „Krumme Widerstandswerte“. Deutsche Funktechnik 1954, Heft 2, S. 41.
- [3] Stejskal, F.: Radio-Taschenbuch, Dümmlers Verlag 1951, Seite 17.

An dieser Stelle Dank an DIETER R. HINTERWÄLLER, DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Referat GK 613 „Widerstände“, der mit seinen Auskünften zur Klärung einiger Fragen beigetragen hat.

### Was bedeutet das in der Praxis?

Ergibt sich bei der Berechnung einer Schaltung beispielsweise ein Widerstandswert von 31,23 k $\Omega$ , lässt sich hier bedenkenlos ein 33-k $\Omega$ -Widerstand verwenden, denn der deckt bei einem Toleranzwert von 10 Prozent den Be-

reich von 29,7 bis 36,3 k $\Omega$  ab. Und einen defekten 30-k $\Omega$ -Widerstand in einem Vorkriegsgerät kann man ebenso bedenkenlos mit einem 33-k $\Omega$ -Widerstand ersetzen, wenn es einen nicht stört, dass dessen Wert sich von demjenigen im Schaltbild unterscheidet und dass das Innenleben des Radios nicht mehr ganz original aussieht.

### „Deutschen Normwerte“ für Widerstände war keine „R10“-Reihe

In deutschen Radios finden sich bis in die 1950er-Jahre Widerstände mit beispielsweise 200  $\Omega$ , 30 k $\Omega$  oder 500 k $\Omega$ , zur gleichen Zeit dagegen in Geräten von Philips oder US-amerikanischen Herstellern solche mit 220  $\Omega$ , 33 k $\Omega$  oder 470 k $\Omega$ . Diese unterschiedlichen Wertestaffelungen basieren auf unterschiedlichen Normen, die es damals in den jeweiligen Ländern gab.

Auch wenn es auf den ersten Blick so erscheint, handelt es sich bei den deutschen Normwerten (nach DIN 41400) nicht um eine einfache arithmetische Reihe (also pro Dekade die Faktoren 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9), die mit „R10“ zu bezeichnen wäre, sondern um eine geometrische Reihe mit den Faktoren 1; 1,25; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 8. [3]. Wie bei den international üblichen E-Reihen werden die Abstände zwischen den einzelnen Faktoren mit steigendem Wert größer. So kommt es, dass im unteren Bereich Stufen mit Bruchteilen der Faktoren zu finden sind und im oberen Bereich einzelne Zahlenfaktoren fehlen (7; 9). Die Unter-

schiede zur international üblichen Staffelung liegen darin begründet, dass man in Deutschland die einzelnen Werte anders berechnet und, damit sich keine „krummen“ Zahlen ergeben, großzügiger gerundet hat. Allerdings nahm man dabei in Kauf, dass sich die aus den Toleranzen ergebenden Wertebereiche nicht so perfekt abgrenzen und wenig überlappen wie bei der Wertestaffelung der inzwischen auch hierzulande üblichen internationalen Norm. Dass es sich bei den „deutschen Normwerten“ nicht um eine arithmetische Reihe handelt, geht auch aus dem Vorwort der aktuell gültigen Norm IEC 60063 „Vorzugsreihen für die Nennwerte von Widerständen und Kondensatoren; identisch mit IEC 60063, Ausgabe 1963 -Ausgabedatum: 1985-12-00“ hervor. Hier wird darauf hingewiesen, dass die E12 und ähnliche Reihen bereits vor der Erstausgabe von 1952 so fest im Markt verankert waren, so dass nicht einmal ein Wechsel zu einer R10 und ähnlichen Reihe umsetzbar gewesen wäre.

### „Anscheinend regellose Widerstandswerte“

In einem in der „Deutschen Funktechnik“ abgedruckten Artikel [2] begründet der DDR-Fachautor FRITZ KUNZE 1954 die Festlegung der von der Radioindustrie bevorzugten Widerstandswerte damit, dass diese auf die „Röhrenwerte“ abgestimmt sein müssten. Deshalb seien die „anscheinend regellosen Widerstandswerte“ (gemeint sind die Werte der E12-Reihe), die in amerikanischen und westeuropäischen Geräten zu finden seien, nur damit zu begründen, dass die Widerstandshersteller keinen Ausschuss produzieren wollten. Das ginge allerdings zu Lasten der Gerätehersteller, und die Röhrenhersteller müssten die „Propagandadaten ihrer Röhren auf diese krummen Werte abgleichen“. Konsequenz: „Wir lehnen in der Deutschen Demokratischen Republik einen solchen Weg ab. Für uns gelten nach wie vor die deutschen DIN-Normen für Widerstandswerte ... Auf diese Normwerte werden auch die Röhrenwerte abgestimmt.“

Mit der Feststellung, dass die Hersteller von Widerständen ihren Ausschuss vermindern wollten, lag KUNZE durchaus richtig. Dass er das als Nachteil einschätzte, ist allerdings fragwürdig, insbesondere in Hinblick auf die Materialökonomie, die ja in der DDR bekanntlich oft problematisch war. Dass die Widerstandswerte auf Röhrendaten abgestimmt sein müssten, ist eigentlich nicht nachvollziehbar: Schließlich lässt sich mit den – wie er formuliert „krummen“ – Widerstandswerten im damals schon üblichen Toleranzschema praktisch jeder

beliebige Wert darstellen. Dass die Radioindustrie bestimmte Werte „bevorzugte“, lag einfach daran, dass genau diese Werte statistisch gesehen häufiger gebraucht wurden als andere.

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

Darüber hinaus werden noch Widerstände von 70 und 700 k $\Omega$  gefertigt.

In Rundfunkschaltungen sind hiervon bevorzugt zu verwenden:

0,25-Watt-Type	125, 250 $\Omega$ , 1, 5, 20, 30, 50, 100, 200, 500, 700 k $\Omega$	1 und 2 M $\Omega$
0,5-Watt-Type	160 $\Omega$ , 10, 160, 300 k $\Omega$	
1-Watt-Type	100 $\Omega$	

Die „deutschen DIN-Normen für Widerstandswerte und die für Rundfunkschaltungen bevorzugten Werte“ ans [1]. (Gemeint ist DIN 41400)