

# **Elektrotechnik-Grundlagen Teil 1**

## **Passive Bauelemente**

Version 1.0

# Inhalt

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. WICHTIGE GRÖßEN .....</b>                              | <b>4</b>  |
| 1.1 STROM .....  | 4         |
| 1.2 LADUNG .....   | 4         |
| 1.3 POTENTIAL .....  | 4         |
| 1.4 SPANNUNG .....   | 4         |
| 1.5 LEISTUNG .....   | 4         |
| 1.6 WIRKUNGSGRAD .....                                       | 5         |
| 1.7 WIDERSTAND .....   | 5         |
| <b>2. GLEICH- UND WECHSELSPANNUNG .....</b>                  | <b>5</b>  |
| 2.1 GLEICHSPANNUNG .....                                     | 5         |
| 2.2 WECHSELSPANNUNG .....                                    | 5         |
| <b>3. UMGANG MIT STROM .....</b>                             | <b>6</b>  |
| 3.1 SCHUTZKLEINSPANNUNGEN .....                              | 6         |
| 3.2 FEHLERSTROMSCHUTZSCHALTER (FI-SCHALTER) .....            | 6         |
| <b>4. DAS OHM'SCHE GESETZ .....</b>                          | <b>7</b>  |
| <b>5. REIHENSCHALTUNG VON WIDERSTÄNDEN .....</b>             | <b>7</b>  |
| <b>6. PAD/ATTENUATION-SCHALTUNG (SPANNUNGSTEILER) .....</b>  | <b>7</b>  |
| <b>7. PARALLELSCHALTUNG VON WIDERSTÄNDEN .....</b>           | <b>8</b>  |
| <b>8. DER KONDENSATOR .....</b>                              | <b>8</b>  |
| 8.1 AN GLEICHSPANNUNG .....                                  | 9         |
| 8.2 AN WECHSELSPANNUNG .....                                 | 9         |
| <b>9. DIE SPULE .....</b>                                    | <b>9</b>  |
| 9.1 INDUKTION .....  | 10        |
| 9.1.1 Generatorprinzip .....                                 | 10        |
| 9.1.2 Selbstinduktion .....                                  | 10        |
| 9.2 DIE SPULE AN GLEICHSPANNUNG .....                        | 11        |
| 9.3 DIE SPULE AN WECHSELSPANNUNG .....                       | 11        |
| <b>10. PASSIVE FILTERSCHALTUNGEN .....</b>                   | <b>11</b> |
| <b>11. PASSIVE FILTERSCHALTUNGEN MIT KONDENSATOREN .....</b> | <b>12</b> |
| 11.1 HOCHPASS 1. ORDNUNG .....                               | 12        |
| 11.2 TIEFPASS 1. ORDNUNG .....                               | 12        |
| 11.3 FILTERSCHALTUNGEN HÖHERER ORDNUNG .....                 | 12        |
| <b>12. PASSIVE FILTERSCHALTUNGEN MIT SPULEN .....</b>        | <b>12</b> |
| 12.1 HOCHPASS 1. ORDNUNG .....                               | 12        |
| 12.2 TIEFPASS 1. ORDNUNG .....                               | 13        |
| 12.3 FILTERSCHALTUNGEN HÖHERER ORDNUNG .....                 | 13        |
| <b>13. ZEITKONSTANTE .....</b>                               | <b>13</b> |
| <b>14. DER ÜBERTRAGER .....</b>                              | <b>14</b> |
| <b>15. DIE PASSIVE DI-BOX .....</b>                          | <b>14</b> |
| <b>16. ALLGEMEINE HINWEISE ZU MESSAUFBAUTEN .....</b>        | <b>15</b> |
| <b>17. MESSUNG ELEMENTARER GRÖßEN .....</b>                  | <b>15</b> |

---

|  |           |
|--|-----------|
| 17.1 GLEICHSTROMMESSUNG .....                                | 15        |
| 17.2 WECHSELSTROMMESSUNG .....                               | 16        |
| <b>18. MESSUNG VON ZEITLICHEN VORGÄNGEN.....</b>             | <b>16</b> |
| <b>19. MESSEQUIPMENT .....</b>                               | <b>17</b> |
| <b>ANHANG 1 FARBCODE-TABELLEN .....</b>                      | <b>18</b> |
| A1.1 FARBKODIERUNG VON WIDERSTÄNDEN MIT 4 RINGEN .....       | 18        |
| A1.2 FARBKODIERUNG VON WIDERSTÄNDEN MIT 5 ODER 6 RINGEN..... | 18        |

# 1. Wichtige Größen

## 1.1 Strom

Formelzeichen:  $I$   
 Einheit:  $A$  (Ampere)

Strom ist Elektronenbewegung (Ladung pro Zeiteinheit). Die Ladung von Elektronen wird in Coulomb angegeben. Die Einheit des Stroms ist also Coulomb pro Sekunde, was Ampere ergibt.

## 1.2 Ladung

Formelzeichen:  $Q$   
 Einheit:  $C$  (Coulomb),  $1C = 1A \cdot s$   
 Formel:  $Q = I \cdot t$

Ladung entsteht, wenn eine gewisse Zeit lang ein Strom zu einem ‚Punkt‘ fließt. Daraus ergibt sich die zusammengesetzte Einheit Coulomb als Ampere-Sekunde. Die kleinste in der Natur vorkommende Ladung, ist die sog. Elementarladung eines Elektrons.

*(Die Umkehrung der Ladungsdefinition aus der Stromdefinition ist natürlich ein bisschen schwach-sinnig und führt zu einem ‚logischen Feedback‘. Das Problem am definieren dieser Größen ist, dass der Strom als sog. Basisgröße definiert wurde, also von keiner anderen Größe abhängt. Für das Verständnis ist das allerdings etwas hinderlich. Man könnte einfacher behaupten, die Ladung sei eine Ansammlung von Elektronen, dabei ist dann allerdings die Einheit von As etwas schwer zu erklären.)*

## 1.3 Potential

Formelzeichen:  $\varphi$  (Phi)  
 Einheit:  $V$  (Volt)

Das Potential ist ein Maß dafür, wie viel Energie (eigentlich Arbeit) nötig ist (oder zur Verfügung gestellt werden kann), wenn eine positive Ladung von einem Punkt zu einem festen Bezugspunkt bewegt wird. Eine Bewegung von einem positiven Potential zu einem nicht ganz so positiven (oder negativen) Potential stellt Energie zur Verfügung, in umgekehrter Richtung muss Energie zugeführt werden.

## 1.4 Spannung

Formelzeichen:  $U$   
 Einheit:  $V$  (Volt)  
 Formel:  $U = \varphi_1 - \varphi_2$

Spannung ist eine Potentialdifferenz. Die Spannung hat gegenüber dem Potential den Vorteil, dass sie unabhängig von Bezugspunkten ist. Im Normalfall wird daher immer die Spannung angegeben.

## 1.5 Leistung

Formelzeichen:  $P$   
 Einheit:  $W$  (Watt),  $1W = 1V \cdot A$   
 Formel:  $P = U \cdot I$

Leistung ist ein Maß für die Energie, die in einem bestimmten Zeitraum verbraucht (oder zur Verfügung gestellt) wird.

## 1.6 Wirkungsgrad

Formelzeichen:  $\eta$  (Eta)

Einheit: - (meist in % angegeben, das ist aber keine Einheit)

Formeln:  $P_{auf} = P_{ab} + P_{Verlust}$

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{auf}} \cdot 100\%$$

Der Wirkungsgrad ist als das Verhältnis von abgegebener Nutzleistung ( $P_{ab}$ ) zu aufgenommener Leistung ( $P_{auf}$ ) definiert. Die restliche Leistung wird als Verlustleistung ( $P_{Verlust}$ ) bezeichnet und im Normalfall als Wärme abgegeben.

## 1.7 Widerstand

Formelzeichen:  $R$

Einheit:  $\Omega$  (Ohm),  $1\Omega = 1 \frac{V}{A}$

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

Die Definition des Widerstandes leitet sich aus dem Ohm'schen Gesetz (2.) ab. Umgangssprachlich ist der Widerstand ein Maß dafür, wie schwer es der Strom hat, durch ein Bauteil hindurchzufließen.

## 2. Gleich- und Wechselspannung

### 2.1 Gleichspannung

Gleichspannungsquellen: Batterie/Akku, Solarzelle, ...

Gleichspannungen werden im Alltag entweder durch chemische Prozesse erzeugt (Batterie) oder aber durch Gleichrichtung aus Wechselspannung generiert. Bei Gleichspannungen gibt es immer einen definierten Plus- und Minuspol, der Strom fließt also immer in einer Richtung. Die technische Stromflussrichtung ist dabei von + nach - (während die physikalische Stromflussrichtung angibt, wie sich die Elektronen bewegen. Das ist von - nach +).

### 2.2 Wechselspannung

Wechselspannungsquellen: Dynamo, Windkraftanlage, Wasserkraftwerk, Kernkraftwerk, ...

Das wohl meist verwendete Prinzip, eine Wechselspannung zu erzeugen ist das Generator-Prinzip. Es wird später noch erklärt werden. Auch unser normaler Hausstrom ist eine Wechselspannung. In einer Schutzkontaktsteckdose liegt zwischen den zwei Kontakten in den „Löchern“ eine Wechselspannung von ca. 230 Volt an. Der eine Kontakt ist der Null- oder Neutraleiter, er ist normalerweise mit der Erde verbunden, und hat damit ein Potential von 0V. Der zweite Kontakt ist die Phase, sie hat eine Spannung von ca. 230V gegen den Nullleiter. Im Gegensatz zur Gleichspannung hat die Phase allerdings keine eindeutige Polarität zum Nullleiter, sondern wechselt die Polarität regelmäßig. Eine Wechselspannung mit einer Frequenz von 50Hz meint also, dass die Polarität der Phase 50 mal in der Sekunde von + nach - und wieder zurück wechselt. Die Spannung hat einen sinusförmigen Verlauf, der angegebene Spannungswert ist der Effektivwert.

Effektivwert (für sinusförmige Spannungen):  $U_{eff} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}$

Eine Wechselspannung mit einem Effektivwert von 230 Volt hat also eine Spitzenspannung von ca. 325 Volt.

Ein Audio-Signal im Mischpult ist nichts anderes als eine Wechselspannung mit variierender Frequenz. Der Spannungswert repräsentiert Lautstärke (z.B. bei +4dBu Linepegel entsprechen 1,23V der maximalen Lautstärke) und die Frequenz repräsentiert die Tonhöhe (je niedriger die Frequenz, desto tiefer der Ton).

### 3. Umgang mit Strom

Die entscheidenden Größen für die Auswirkung von Stromunfällen für den Menschen sind Strom und Zeit. Eine Spannung alleine ist noch kein Indikator für das Gefahrenpotential. Zwar hängen beide Größen miteinander zusammen (erst wenn die Spannung bei gegebenem Widerstand groß genug wird, kann auch ein entsprechender Strom fließen), dennoch kommt es z.B. bei statischer Entladung vor, dass bei Spannungen, die mehrere 1000 Volt betragen können, nur geringe, für den Menschen völlig ungefährliche Ströme fließen.

#### **Elektrischer Schlag aus statischer Entladung (Spannung von bis zu einigen 1000 Volt)**

Es besteht zwar eine hohe Potentialdifferenz, mit einem kurzen Stromstoß findet allerdings ein Potentialausgleich statt. Dabei wird nicht besonders viel Ladung bewegt, es fließt also nur eine kurze Zeit lang Strom. Ist die Potentialdifferenz ausgeglichen, fließt auch kein Strom mehr.

#### **Elektrischer Schlag aus der „Steckdose“ (Spannung von 230 Volt)**

Es besteht eine (im Vergleich zur statischen Entladung) geringe Potentialdifferenz, diese wird allerdings durch den Stromfluss nicht ausgeglichen, sondern vom Spannungserzeuger aufrecht erhalten. Es fließt also ein konstanter Strom in einer für den Menschen gefährlichen Stärke. Bei Wechselspannung kommt erschwerend hinzu, dass die gepulsten Stromstöße Muskelkontraktionen auslösen. In der Armmuskulatur führt dies z.B. zum Festhalten am stromführenden Teil, beim Herzmuskel können die 50Hz Wechselspannung zu Kammerflimmern führen.

#### 3.1 Schutzkleinspannungen

Man geht davon aus, dass erst ab einer gewissen Spannung für den Menschen kritische Ströme fließen können. Spannungen bis 50V Wechsel- und 120V Gleichspannung werden als „unkritisch“ eingestuft, daher dürfen Geräte, die in diesem Bereich arbeiten, unter gewissen Umständen ohne Schutzleiter betrieben werden. Geräte, die mit höheren Spannungen arbeiten, **müssen** im Normalfall mit Schutzleiter betrieben werden, dieser darf **auf keinen Fall** entfernt werden, er kann im Störfall **Leben retten!** Da die Stromstärke allerdings nicht nur von der Spannung sondern auch vom Widerstand abhängt, und der Körperwiderstand wiederum von verschiedenen Faktoren wie z.B. Hautfeuchtigkeit abhängt kann es unter ungünstigen Umständen auch bei Schutzkleinspannungen zu gefährlichen Stromschlägen kommen. „Bastelarbeiten“, Elektroinstallationen, usw. am Stromnetz sind daher nicht ungefährlich und müssen qualifiziertem Fachpersonal überlassen werden!

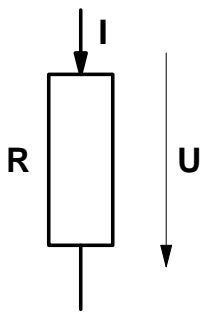
#### 3.2 Fehlerstromschutzschalter (FI-Schalter)

Der Fehlerstromschutzschalter, kurz FI-Schalter (F für Fehler, I für das Formelzeichen des Stroms), engl. RCD oder „residual current device“ genannt, ist eine Schutzeinrichtung in Stromnetzen, die den angeschlossenen, überwachten Stromkreis vom restlichen Stromnetz abtrennt, wenn Strom den überwachten Stromkreis auf falschem Weg verlässt (über den Schutzleiter). Er wird normalerweise im Sicherungskasten, zusätzlich zu den Überstromschutzorganen (Sicherungsautomaten, Schmelzsicherungen, etc.) installiert. Ein üblicher Auslösewert wäre z.B. 30mA. Der FI-Schalter stellt also sicher, dass bei einem Stromunfall kein für den Menschen kritischer Strom fließen kann. Daher sollte man drauf achten, dass „gefährdete Bereiche“ (z.B. Badezimmer, Außensteckdosen, Beschallungsanlagen, ...) mit

einem FI-Schalter abgesichert sind. Eine „normale“ Sicherung erfüllt diesen Zweck nicht, sie schützt nur vor Strömen, die zu Kabelbrand führen, Geräte zerstören oder ähnliche Schäden anrichten könnten. Sie sind nicht primär zum Schutz von Menschenleben konzipiert.

## 4. Das Ohm'sche Gesetz

Die Spannung an einem Bauelement und der Strom, der durch dieses hindurchfließt, verhalten sich zueinander proportional.



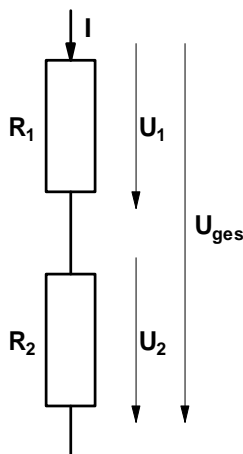
$$U \sim I$$

$$\frac{U}{I} = konst.$$

$$U = R \cdot I$$

Den Proportionalitätsfaktor  $R$  bezeichnet man als Widerstand. Der Widerstand ist eine Größe, die vom Material eines Bauelements, an das eine Spannung angelegt wird, und dessen Beschaffenheit (Länge, Durchmesser, ...) abhängt.

## 5. Reihenschaltung von Widerständen



$$I = konstant$$

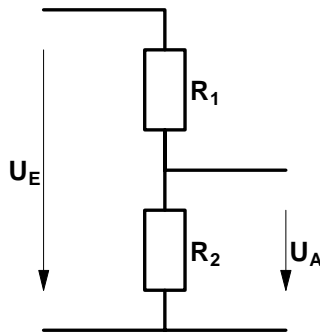
$$R_{ges} = R_1 + R_2$$

$$U_{ges} = U_1 + U_2$$

$$I = \frac{U_{ges}}{R_{ges}} = \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2}$$

## 6. PAD/Attenuation-Schaltung (Spannungsteiler)

Eine einfache tontechnische Anwendung für die Reihenschaltung von Widerständen ist die sogenannte PAD bzw. Attenuation-Schaltung, die ein einkommendes Signal um einen festgelegten dB-Wert absenkt. Zu beachten ist, dass hier angenommen wird, der Eingang des nächsten Bauteils wäre unendlich groß. Ansonsten müsste man einen ‚belasteten Spannungsteiler‘ berechnen.



Um einen dB-Wert in ein Spannungsverhältnis umzurechnen, stellen wir die aus der Pegelrechnung bekannte Formel für den relativen Spannungspegel entsprechend um:

$$p = 20 \cdot \lg \frac{U_A}{U_E} \Rightarrow \frac{p}{20} = \lg \frac{U_A}{U_E} \Rightarrow 10^{\frac{p}{20}} = \frac{U_A}{U_E}$$

Das Verhältnis der Spannungen lässt sich über das Verhältnis der Widerstände festlegen:

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{R_2}{R_{ges}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

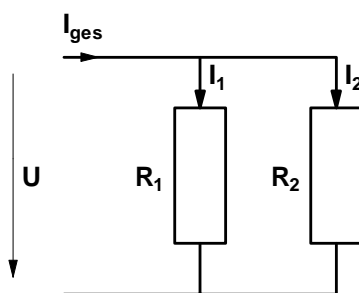
**Jetzt noch ein kleines Beispiel:** Widerstände für ein -20dB-PAD dimensionieren.

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{U_A}{U_E} = 10^{\frac{-20}{20}} = \frac{1}{10}$$

Einer der Widerstände darf frei erfunden werden, z.B.  $R_2 = 1k\Omega$ . Der Andere kann dann berechnet werden:

$$\frac{1k\Omega}{R_1 + 1k\Omega} = \frac{1}{10} \Rightarrow 10k\Omega = R_1 + 1k\Omega \Rightarrow \underline{\underline{R_1 = 9k\Omega}}$$

## 7. Parallelschaltung von Widerständen



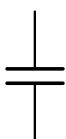
$$U = \text{konstant}$$

$$I_{ges} = I_1 + I_2$$

$$\frac{1}{R_{ges}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$U = R_{ges} \cdot I_{ges} = R_1 \cdot I_1 = R_2 \cdot I_2$$

## 8. Der Kondensator



Formelzeichen:  $C$  (Kapazität)



Einheit:  $F(\text{Farad}), 1F = 1 \frac{As}{V}$

Formeln:  $C = \frac{Q}{U}$   
 $C = A \cdot \frac{1}{d} \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$  (A=Plattenfläche, d=Plattenabstand)

Dielektrizitätskonstante:  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$

Dielektrizitätszahl:  $\epsilon_r$  (Zahl ohne Einheit, für Luft ca. 1)

## 8.1 An Gleichspannung

Wird der Stromkreis geschlossen und befindet sich der Kondensator im entladenen Zustand, fließt im ersten Augenblick ein sehr hoher Strom, der Kondensator hat also einen geringen Widerstand. Je mehr der Kondensator sich auflädt, desto weniger Strom fließt, bis er letztendlich voll geladen ist, und der Stromfluss zum Erliegen kommt. Mit zunehmender Ladung steigt folglich auch der Widerstand, bis er praktisch unendlich groß ist (geladener Zustand des Kondensators). Die Spannung, die am Kondensator abfällt, beträgt im ungeladenen Zustand (Stromkreis wird geschlossen) 0V und steigt mit zunehmender Ladung des Kondensators bis zur angelegten Spannung.

## 8.2 An Wechselspannung

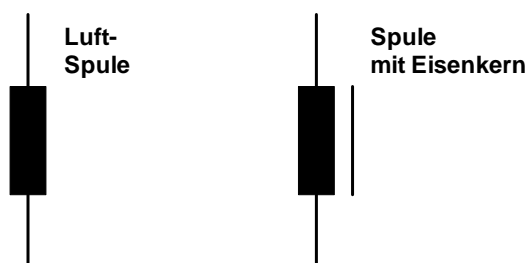
Wird der Kondensator in einem Wechselstromkreis betrieben, so ist sein Widerstand abhängig von der Frequenz der Wechselspannung. Ist die Frequenz hoch, ändert sich auch die Polarität der Spannung häufig. Bei jedem „Umladevorgang“ wird daher nur wenig Ladung auf dem Kondensator zwischengespeichert, sein Widerstand ist folglich gering. Je niedriger die Frequenz der Wechselspannung wird, desto mehr Ladung wird bei jedem Umladevorgang auf dem Kondensator zwischengespeichert. Der Widerstand steigt mit sinkender Frequenz bis er bei einer Frequenz von 0Hz (Gleichspannung) praktisch unendlich hoch ist.

Den frequenzabhängigen Widerstand nennt man Blindwiderstand. Er kann beim Kondensator nach folgender Formel errechnet werden:

Kapazitiver Blindwiderstand  $X_c = \frac{1}{2\pi f C}$

Bei einer Kapazität eilt der Strom der Spannung um 90° vor.

## 9. Die Spule



Formelzeichen:  $L$  (Induktivität)

Einheit:  $H$  (Henry),  $1H = 1 \frac{Vs}{A}$

Formel:  $L = A \cdot n^2 \cdot \frac{1}{l} \cdot \mu_0 \cdot \mu_r$  (A= Leiterquerschnitt, n= Windungszahl, l= Länge)

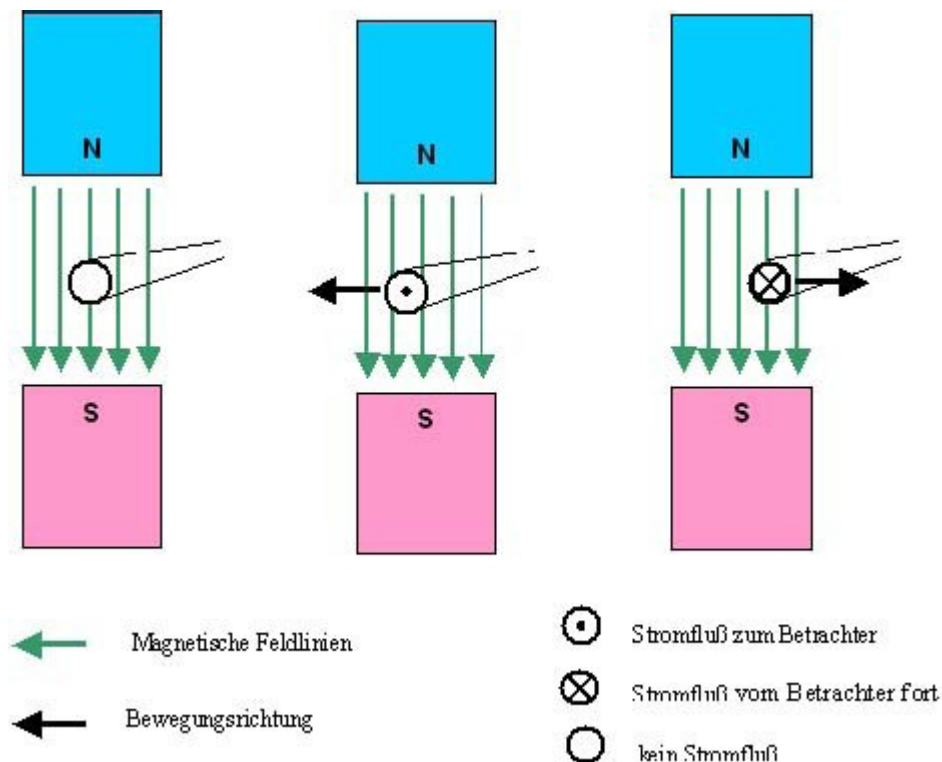
Magnetische Feldkonstante:  $\mu_0 \approx 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am}$

Permeabilitätszahl:  $\mu_r$  gibt die magnetische Leitfähigkeit an.

$\mu_r$  ist (auch für einen Werkstoff) nicht konstant, sondern hängt vom Magnetisierungszustand ab.

### 9.1 Induktion

Wenn man einen Leiter in einem Magnetfeld bewegt, wird in diesen Leiter eine Spannung induziert. Diese Induktionsspannung ist am größten, wenn man den Leiter senkrecht zum Magnetfeld bewegt. Durch die Bewegungsrichtung wird bestimmt, welche Polarität die Induktionsspannung hat.



#### 9.1.1 Generatorprinzip

Wenn man eine Spule in einem Magnetfeld dreht, wird auch in sie eine Spannung induziert. Das Magnetfeld, das sich (aus Sicht der Spule) durch die Drehung ständig umpolt (Nord-Süd nach Süd-Nord und umgekehrt) bewirkt gleichzeitig eine Änderung der Polarität der Induktionsspannung. Wenn also die Spule mit gleich bleibender Geschwindigkeit gedreht wird ist die Induktionsspannung eine sinusförmige Wechselspannung.

#### 9.1.2 Selbstinduktion

Wenn Strom durch eine Spule fließt, bildet sich um diese ein Magnetfeld. Ändert sich der Stromfluss durch die Spule, ändert sich damit auch das Magnetfeld. Auch in diesem Fall kommt es zu einer Induktionsspannung in der Spule. Die Polarität dieser Induktionsspannung ist der Polarität ihrer Erzeugerspannung stets entgegen gerichtet.

Formel: 
$$U_{ind} = -L \cdot \frac{dI}{dt}$$

Eine abrupte Änderung des Stromflusses durch die Spule erzeugt also eine hohe Induktionsspannung in der Spule. Technisch wird die Selbstinduktion in vielfacher Weise benutzt. Störende oder gefährliche Spannungsänderungen in der Leitung, zum Beispiel durch Ab- oder Zuschalten großer Verbraucher oder durch Blitzeinschlag, können durch Einbau einer Drosselspule abgedämpft werden.

### 9.2 Die Spule an Gleichspannung

In dem Moment, in dem der Stromkreis geschlossen wird, baut sich ein Magnetfeld um die Spule auf. Für einen kurzen Moment kommt es zur Selbstinduktion. Wenn das Magnetfeld „steht“, kann der Strom ungehindert die Spule passieren. Der Widerstand der Spule beschränkt sich auf den reinen Drahtwiderstand.

### 9.3 Die Spule an Wechselspannung

Wird die Spule in einem Wechselstromkreis betrieben, sorgt die sich ständig ändernde Polarität für ein sich ständig änderndes Magnetfeld um die Spule. Eine höhere Frequenz der Spannung bedingt mehr Änderungen im magnetischen Feld pro Zeit, also kommt es auch zu einer größeren Induktionsspannung. Die Polarität der Induktionsspannung stellt sich der Polarität der Erzeugerspannung entgegen. Damit steigt der Widerstand der Spule mit der Frequenz der Spannung an. Auch die Spule hat also einen frequenzabhängigen Widerstand. Man errechnet ihn über die Formel:

$$\text{Induktiver Blindwiderstand } X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

Bei einer Induktivität eilt der Strom der Spannung um 90° hinterher.

## 10. Passive Filterschaltungen

Aus Widerstand und Kondensator bzw. Widerstand und Spule kann man einfache, passive Filterschaltungen zusammensetzen. Diese werden auf Grund der Formelzeichen für Widerstand (R) und Kondensator (C) auch „RC-Glieder“ genannt.

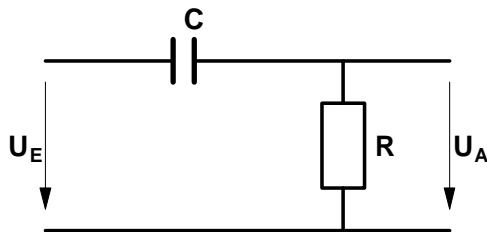
„Passiv“ bedeutet, es kommen nur passive Bauelemente zum Einsatz, also nur Bauteile, die keine zusätzliche Betriebsspannung benötigen. Dieses bringt die Eigenschaft mit sich, dass passive Filter die Eingangssignale - im Gegensatz zu aktiven Schaltungen - nur bedämpfen können. Die Ordnungszahl einer Filterschaltung gibt ihre Flankensteilheit an. Ein Filter erster Ordnung hat eine Flankensteilheit von 6dB pro Oktave. Filter zweiter Ordnung haben eine Flankensteilheit von 12dB pro Oktave und Filter mit der Ordnungszahl N haben eine Flankensteilheit von N•6dB pro Oktave. Die Grenzfrequenz ist definiert als diejenige Frequenz, bei der der Pegel am Ausgang um 3dB unterschiedlich zum Eingang ist.

Passive Filter schieben verschieben die Phase des Ausgangssignals abhängig von der Frequenz. Bei einem Filter 1. Ordnung ist an der Grenzfrequenz die Phasenverschiebung 45°. Bei der Frequenz, an der das Filter am stärksten bedämpft, ist die Phasenverschiebung 90°.

| Filter                                      | Hochpass | Tiefpass | Bandpass | Bandsperr |
|---|----------|----------|----------|-----------|
| Symbol                                      |          |          |          |           |
| Aufbau der Schaltung aus Hoch- und Tiefpass | s.o.     | s.o.     |          |           |

## 11. Passive Filterschaltungen mit Kondensatoren

### 11.1 Hochpass 1. Ordnung

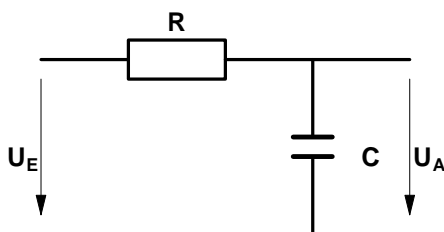


Flankensteilheit: 6dB/Oktave

$$\text{Grenzfrequenz: } f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

Bei dieser Schaltung wird ein Spannungsteiler mit einem Ohmschen und einem kapazitiven Widerstand aufgebaut. Für tiefe Frequenzen hat C einen hohen Widerstand gegenüber R, ein Großteil der tieffrequenten Spannungsteile fällt an ihm ab. Für hohe Frequenzen hat R einen hohen Widerstand gegenüber C, der Großteil der hochfrequenten Signalanteile fällt an ihm und damit am Ausgang der Schaltung ab.

### 11.2 Tiefpass 1. Ordnung



Flankensteilheit: 6dB/Oktave

$$\text{Grenzfrequenz: } f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

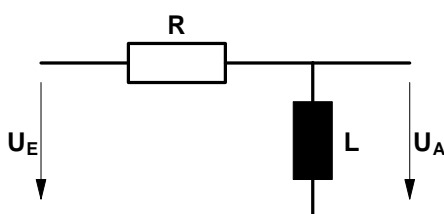
In dieser Schaltungsvariante fällt die Ausgangsspannung an C ab, die Situation dreht sich um. Ein Großteil der tieffrequenten Signale fällt am Ausgang der Schaltung ab, während der Großteil der hochfrequenten Signale herausgefiltert wird.

### 11.3 Filterschaltungen höherer Ordnung

Im einfachsten Fall können höhere Ordnungen dadurch erreicht werden, dass mehrere baugleiche Filter 1.Ordnung hintereinander geschaltet werden. Die Grenzfrequenz verschiebt sich dann allerdings auch. Die Flankensteilheit ist hier  $N \cdot 6\text{dB/Oktave}$  ( $N=\text{Ordnung}$ ).

## 12. Passive Filterschaltungen mit Spulen

### 12.1 Hochpass 1. Ordnung

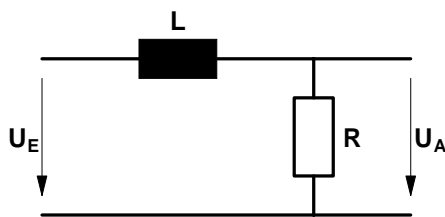


Flankensteilheit: 6dB/Oktave

$$\text{Grenzfrequenz: } f_g = \frac{R}{2 \cdot \pi \cdot L}$$

Bei dieser Schaltung wird ein Spannungsteiler mit einem Ohmschen und einem induktiven Widerstand aufgebaut. Für tiefe Frequenzen hat R einen hohen Widerstand gegenüber L, ein Großteil der tieffrequenten Spannungsteile fällt an ihm ab. Für hohe Frequenzen hat L einen hohen Widerstand gegenüber R, der Großteil der hochfrequenten Signalanteile fällt an ihm und damit am Ausgang der Schaltung ab.

### 12.2 Tiefpass 1. Ordnung



Flankensteilheit: 6dB/Oktave

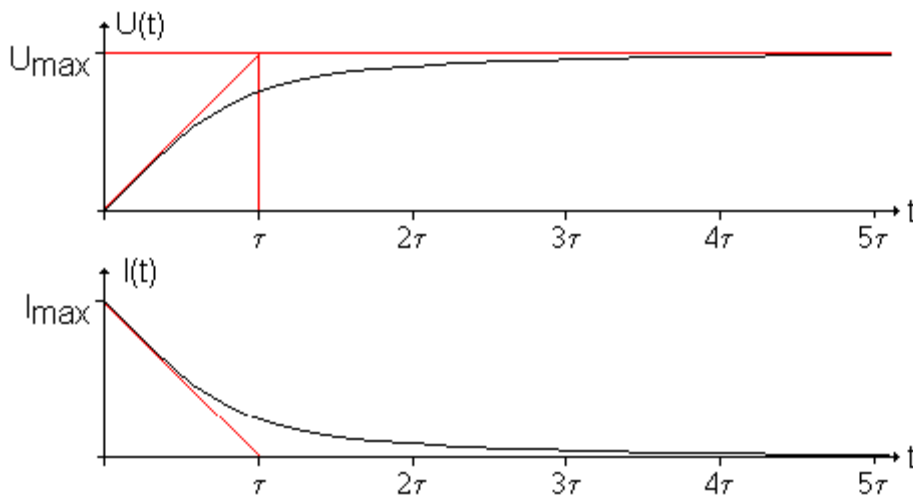
$$\text{Grenzfrequenz: } f_g = \frac{R}{2 \cdot \pi \cdot L}$$

In dieser Schaltungsvariante fällt die Ausgangsspannung an R ab, die Situation dreht sich um. Ein Großteil der tieffrequenten Signale fällt am Ausgang der Schaltung ab, während der Großteil der hochfrequenten Signale herausgefiltert wird.

### 12.3 Filterschaltungen höherer Ordnung

Im einfachsten Fall können höhere Ordnungen dadurch erreicht werden, dass mehrere baugleiche Filter 1.Ordnung hintereinander geschaltet werden. Die Grenzfrequenz verschiebt sich dann allerdings auch. Die Flankensteilheit ist hier  $N \cdot 6\text{dB/Oktave}$  ( $N = \text{Ordnung}$ ).

### 13. Zeitkonstante



Man kann die Grenzfrequenz von Filterschaltungen auch durch die so genannte Zeitkonstante eines RC-Gliedes angeben. Man erhält sie, wenn man den Spannungs- und Stromverlauf für den Ladevorgang eines Kondensators im Gleichstromkreis graphisch darstellt und im Nullpunkt eine Tangente an den Graphen anlegt. Man „linearisiert“ also den Vorgang und nimmt an, dass der Strom linear weiter fällt, bzw. die Spannung linear weiter steigt. Die Zeitkonstante sagt demnach aus, wann der Kondensator bei einem linearen Spannungsverlauf voll geladen wäre. Die Zeitkonstante für einen Kondensator, der über einen Widerstand geladen wird (RC-Glied) berechnet man über die Formel:

$$\tau = R \cdot C \quad \tau(\text{tau}) \text{ ist die Zeitkonstante}$$

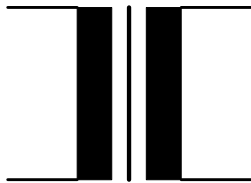
Real ist ein Kondensator bei  $1 \cdot \tau$  zu 63,2% geladen, bzw beim Entladen liegen noch 36,8% der Spannung an. Auch für eine Kombination aus Widerstand und Spule kann eine Zeitkonstante errechnet werden, hier gilt:

$$\tau = \frac{L}{R}$$

Für die Grenzfrequenz in einem Filter 1.Ordnung gilt dann allgemein:

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau}$$

## 14. Der Übertrager



Ein einfacher Transformator besteht aus zwei Spulen, der Primär- und der Sekundärspule. Legt man eine Spannung an die Primärspule an, baut sich ein Magnetfeld um diese auf, welches bei Änderung des Stroms eine Spannung in die Sekundärspule induziert. Es kommt also nur bei Wechselspannungen zu einer Induktion, Gleichspannungen werden nicht mit übertragen.

Für ideale Übertrager gilt:

$$P_1 = P_2 \quad (\text{Wirkungsgrad } 100\%, \text{ das gibt es in der Realität nicht!})$$

Der Übertragungsfaktor ( $\ddot{u}$ ) gibt das Verhältnis der Windungen beider Spulen zueinander an:

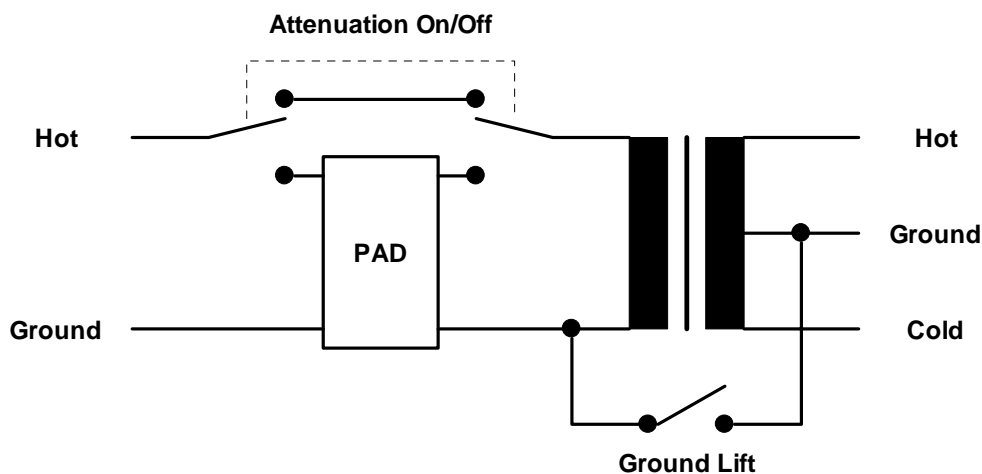
$$\text{Übertragungsfaktor: } \ddot{u} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

$$\text{Eingangs-/Ausgangswiderstand: } \ddot{u} = \sqrt{\frac{R_{\text{Eingang}}}{R_{\text{Ausgang}}}} \quad (\text{Eigentlich Impedanzen!})$$

## 15. Die passive DI-Box

Anwendungen:

- Symmetrierung
- Galvanische Trennung



## 16. Allgemeine Hinweise zu Messaufbauten

Der wichtigste Lehrsatz der Messtechnik lautet: „Wer misst, misst Mist.“ Damit hat man die wesentlichen Probleme schon auf den Punkt gebracht. **Es ist praktisch nicht möglich, exakte Messungen vorzunehmen!** Jeder Messaufbau beeinflusst immer auch die Messgröße und verfälscht damit das Ergebnis. Man sollte sich bei jeder Messung dieses Problems bewusst sein. Nur so kann man seine gewonnenen Ergebnisse richtig beurteilen.

Ein Messergebnis liefert den tatsächlich vorhandenen Wert mit einer Messabweichung. Diese Messabweichung hängt vom benutzten Messgerät, der Kalibrierung des selbigen und der Einbindung des Gerätes in den Aufbau ab. Wenn man z.B. die Akustik eines Raumes beurteilen möchte, dann wird jedes Messgerät, das man in diesem Raum aufbaut, die Akustik selbst auch beeinflussen. Man misst in diesem Fall also die Akustik des Raumes mit einem Messaufbau und nicht die pure Akustik des Raumes.

Das Ziel bei einer jeden Messung sollte sein, die Einflüsse des Messaufbaus festzustellen, so klein wie möglich zu halten und zu dokumentieren. Nur in diesem Fall ist es für Außenstehende möglich, die Messung zu beurteilen.

## 17. Messung elementarer Größen

Elementare Größen bezeichnet hier Strom, Spannung, Widerstand und Leistung. Nicht-elektrische Größen sollen in dieser Beschreibung nicht berücksichtigt werden.

### 17.1 Gleichstrommessung

Alle hier beschriebenen Größen lassen sich mit einem einfachen Multimeter messen (wobei natürlich die Messgenauigkeit zu berücksichtigen ist).

#### **Strom:**

Zur Strommessung wird ein Messgerät mit möglichst kleinem Innenwiderstand (ideal 0 Ohm) in den zu messenden Weg geschaltet (Reihenschaltung). Damit wird das Messgerät von dem Strom durchflossen, der auch durch den Rest der Schaltung fließt.

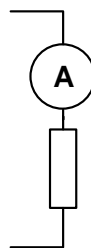


Abbildung 1 – Strommessung

Probleme ergeben sich dadurch, dass ein reales Messgerät keinen 0 Ohm – Eingang besitzt und daher den realen Stromfluss verändert. Zusätzlich misst das Gerät diesen Strom auch nicht genau.

**Spannung:**

Für die Spannungsmessung wird ein Messgerät parallel zu dem Schaltungsteil (im einfachsten Fall ein Widerstand), über dem die Spannung gemessen werden soll, geschaltet. Damit der Strom nicht die ‚Abkürzung‘ über das Messgerät nimmt, sollte der Innenwiderstand des Messgerätes möglichst groß sein (ideal  $\infty$ ).

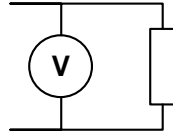


Abbildung 2 – Spannungsmessung

**Widerstand:**

Der Widerstand kann innerhalb einer Schaltung am besten aus Strom und Spannung errechnet werden. Für einzelne Bauteile kann auch die Widerstands-Messfunktion eines Multimeters genutzt werden.

**Leistung:**

Die Leistung wird, wie auch der Widerstand, aus Strom und Spannung berechnet. Es gibt Messgeräte, die diese Aufgabe bereits übernehmen.

**17.2 Wechselstrommessung**

Bei Wechselstrommessungen sollte als erstes das Ziel der Messung ermittelt werden. Wenn die zeitlichen Abläufe von Interesse sind, werden Verfahren benutzt, wie sie unter 4. beschrieben sind. Häufig genügt bei Wechselstromsignalen aber auch eine Messung von Spitzenwerten oder von so genannten Effektivwerten. Dies ist immer dann sinnvoll, wenn sich ein Signal periodisch wiederholt und die eigentliche Signalform nicht von Interesse ist.

Die Spitzenwertmessung kann zum Beispiel mit einem Oszilloskop vorgenommen werden und gibt die Amplitude entweder nur in der positiven Richtung oder in beiden Richtungen (peak-to-peak) an.

Multimeter messen normalerweise Effektivwerte für sinusförmige Signale. Dies sind zeitliche Mittelwerte, die auf Sinussignale bezogen werden. Für andere Signalformen stimmen die Messergebnisse dann nicht!

**18. Messung von zeitlichen Vorgängen**

Die Messung von zeitlichen Vorgängen betrifft in der Tontechnik normalerweise Änderungen im Spannungsverlauf.

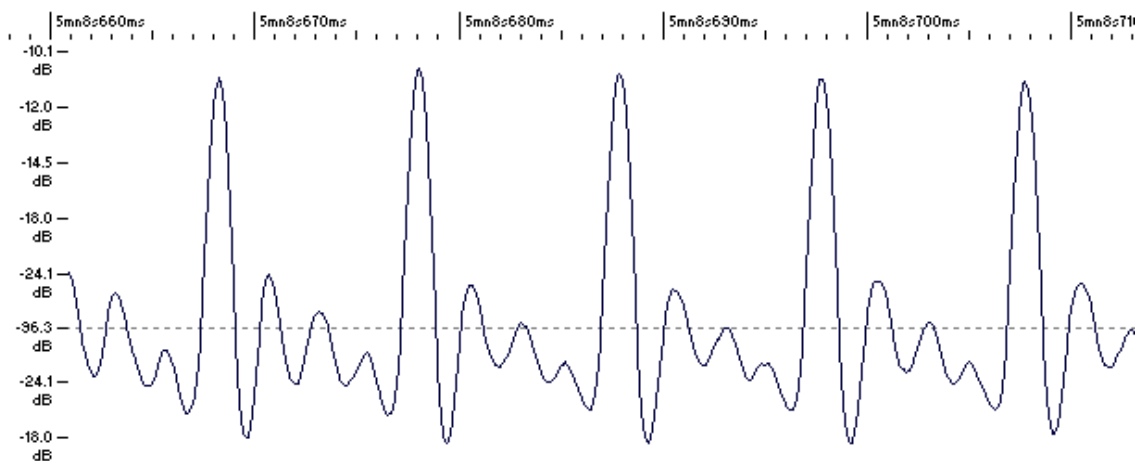


Abbildung 3 - Oszillogramm aus WaveLab



## 19. Messequipment

Aus Abschnitt 2 lässt sich für das zu verwendende Messequipment ein wichtiger Schluss ziehen: Man sollte immer das beste *erhältliche* Messequipment benutzen. Kein schlechteres, aber auch kein besseres!. Mit diesem Equipment (und sei es noch so gut oder schlecht) führt man die Messung durch und dokumentiert, welche Fehler sich aus dem Equipment ergeben.

**Eine gut dokumentierte Messung mit schlechtem Equipment ist viel aussagekräftiger, als eine schlecht dokumentierte Messung mit sehr teurem Spitzen-Equipment!**

Studenten unterliegen bei Ihren Arbeiten häufig der Wahnvorstellung, eine Messung mit billigen Messgeräten würde zu Abzügen in der Benotung führen. Dies ist allerdings keineswegs der Fall. Zu Abzügen in der Benotung führt in der Regel ein falscher Umgang mit dem vorhandenen Equipment.

Zu einer messtechnischen Arbeit gehören genaue Angaben über die benutzten Messgeräte. Zu jedem Messgerät sollte (wenn möglich) eine Angabe der relevanten Ungenauigkeiten geliefert werden. Bei einem Messmikrofon sollte z.B. der Frequenzgang angegeben werden.

Die Fehler einer Messkette lassen sich oft durch einfache Mittel weitestgehend aus der Messung eliminieren. Dies soll hier am Beispiel einer Frequenzgangmessung an einem Equalizer kurz erläutert werden:

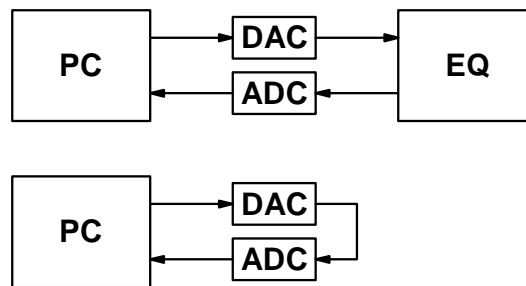


Abbildung 4 - Messkette und Referenz-Messkette

Bei der Messung an einem analogen Equalizer soll hier ein Messsystem auf einem PC zum Einsatz kommen. Dazu ist es nötig, eine Messkette aus PC, D/A-Umsetzer, EQ und A/D-Umsetzer aufzubauen. Wie allgemein bekannt sein dürfte, werden aber vor allem die Umsetzer einiges an Fehlern erzeugen. Um diese Fehler nicht auf den Equalizer zu schieben, sollte die ganze Kette auch einmal ohne den Equalizer gemessen werden (siehe Abbildung). Diese Referenzmessung liefert die Ungenauigkeiten des Systems, die bei der Messung mit dem Equalizer einfach abgezogen werden können. Selbst einfache Messsoftware bietet normalerweise diese Möglichkeit an.

## Anhang 1 Farbcode-Tabellen

Quelle: Wikipedia, [http://de.wikipedia.org/wiki/Widerstand\\_\(Bauelement\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Widerstand_(Bauelement))

### A1.1 Farbkodierung von Widerständen mit 4 Ringen

| Farbe   |   | Widerstandswert in $\Omega$ |                        |                            | Toleranz |
|---------|---|-----------------------------|------------------------|----------------------------|----------|
|         |   | 1. Ring<br>(1. Ziffer)      | 2. Ring<br>(2. Ziffer) | 3. Ring<br>(Multiplikator) | 4. Ring  |
| „keine“ | × | —                           | —                      | —                          | ±20 %    |
| silber  |   | —                           | —                      | $10^{-2} = 0,01$           | ±10 %    |
| gold    |   | —                           | —                      | $10^{-1} = 0,1$            | ±5 %     |
| schwarz |   | —                           | 0                      | $10^0 = 1$                 | —        |
| braun   |   | 1                           | 1                      | $10^1 = 10$                | ±1 %     |
| rot     |   | 2                           | 2                      | $10^2 = 100$               | ±2 %     |
| orange  |   | 3                           | 3                      | $10^3 = 1.000$             | —        |
| gelb    |   | 4                           | 4                      | $10^4 = 10.000$            | —        |
| grün    |   | 5                           | 5                      | $10^5 = 100.000$           | ±0,5 %   |
| blau    |   | 6                           | 6                      | $10^6 = 1.000.000$         | ±0,25 %  |
| violett |   | 7                           | 7                      | $10^7 = 10.000.000$        | ±0,1 %   |
| grau    |   | 8                           | 8                      | $10^8 = 100.000.000$       | —        |
| weiß    |   | 9                           | 9                      | $10^9 = 1.000.000.000$     | —        |

### A1.2 Farbkodierung von Widerständen mit 5 oder 6 Ringen

| Farbe   | 1. Ring<br>(1. Ziffer) | 2. Ring<br>(2. Ziffer) | 3. Ring<br>(3. Ziffer) | 4. Ring<br>(Multiplikator) | 5. Ring<br>(Toleranz) | 6. Ring<br>(Temp. Koeffizient)     |
|---------|------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------------------|
| silber  |                        |                        |                        | $10^{-2}$                  |                       |                                    |
| gold    |                        |                        |                        | $10^{-1}$                  |                       |                                    |
| schwarz |                        | 0                      | 0                      | $10^0$                     |                       | $200 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ |
| braun   | 1                      | 1                      | 1                      | $10^1$                     | ±1%                   | $100 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ |
| rot     | 2                      | 2                      | 2                      | $10^2$                     | ±2%                   | $50 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  |
| orange  | 3                      | 3                      | 3                      | $10^3$                     |                       | $15 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  |
| gelb    | 4                      | 4                      | 4                      | $10^4$                     |                       | $25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  |
| grün    | 5                      | 5                      | 5                      | $10^5$                     | ±0,5%                 |                                    |
| blau    | 6                      | 6                      | 6                      | $10^6$                     | ±0,25%                | $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  |
| violett | 7                      | 7                      | 7                      |                            | ±0,1%                 | $5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$   |
| grau    | 8                      | 8                      | 8                      |                            | ±0,05%                |                                    |
| weiß    | 9                      | 9                      | 9                      |                            |                       |                                    |