

## Repetitorium 6

Nach dem Seitensprung in die Mathematik geht es heute wieder mit Elektrotechnik weiter. Bevor wir mit der Hauptvorlesung beginnen, noch ein paar hoffentlich klärende Aussagen zu Themen, mit denen viele HörerInnen Schwierigkeiten haben:

### Definitionen der Äquivalente

Jedes elektrische lineare Netzwerk kann im Endeffekt durch eine reale Spannungsquelle, also eine Serienschaltung einer idealen Spannungsquelle mit einem Widerstand, ersetzt werden. Diese Ersatzschaltung nennt man Thévenin – Äquivalent.

Jedes elektrische lineare Netzwerk kann im Endeffekt durch eine reale Stromquelle, also eine Parallelschaltung einer idealen Stromquelle mit einem Widerstand, ersetzt werden. Diese Ersatzschaltung nennt man Norton – Äquivalent.

Der Serienwiderstand des Thévenin – Äquivalentes und der Parallelwiderstand des Norton – Äquivalentes sind gleich.

Daher sind Thévenin – Äquivalent und Norton – Äquivalent immer zueinander äquivalent. Wie man die Schaltung repräsentiert, ist nicht „absolut“ festgelegt, man wählt aufgrund des Widerstandes. Ist der Widerstand „hoch“, handelt es sich um eine Stromquelle. Ist der Widerstand „niedrig“, handelt es sich um eine Spannungsquelle.

### Strom ohne Spannung?

Es ist eigentlich nicht einsichtig, wie ein Strom ohne Spannung vorliegen kann. Wollen wir einmal das Spezialthema Supraleitung außer Acht lassen, argumentiert man wie folgt:

Gemäß dem Ohmschen Gesetz ist  $U = R \cdot I$ , daher ist  $U = 0$  wenn  $R = 0$  ist, egal wie hoch der Strom ist. Hochwertige moderne Strommessgeräte haben tatsächlich Serienwiderstände im Bereich von Milliohm, bei den magnetischen Stromwandlern kommt man noch darunter.

Das alles hat aber nichts mit der Stromgenerierung in der Stromquelle zu tun! Selbstverständlich funktioniert eine Stromquelle nur mit einer Versorgungsspannung!

### Unbestimmte Ausdrücke

Welchen Widerstandswert hat ein elektrischer Widerstand, wenn man keine Spannung anlegt? Das Ohmsche Gesetz lautet bekanntlich

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

Wie argumentiert man aber, wenn  $U = 0$  und damit  $I = 0$  werden? Dann entsteht der unbestimmte Ausdruck

$$R = \frac{0}{0}$$

Offensichtlich handelt es sich um eine „hebbare Unstetigkeit“. Dieser begegnet man mit der Regel von L'Hospital. Beispielsweise legt man an den Widerstand eine zeitlich veränderliche Spannung an (Aufnahme der Kennlinie) und misst den entsprechenden Strom. Bis zu den Zerstörungsgrenzen ergibt sich eine Gerade. Mathematisch kann man das beispielsweise so darstellen: Wir wählen willkürlich eine zeitlich veränderliche Spannung, beispielsweise

$$U(t) = U_0 \cdot (t - 1), 0 \leq t \leq 2$$

Damit ergibt sich ein linearer Spannungsverlauf, der innerhalb von 2 Sekunden von  $-U_0$  bis  $+U_0$  führt. Der daraus resultierende Strom ist

$$I(t) = \frac{U(t)}{R}$$

Einsetzen

$$R = \frac{U(t)}{I(t)} = \frac{U_0 \cdot (t - 1)}{\frac{U_0 \cdot (t - 1)}{R}} = R \cdot \frac{U_0 \cdot (t - 1)}{U_0 \cdot (t - 1)}$$

Dieser Ausdruck ist natürlich an allen Stellen  $R$ , ausgenommen an  $t = 1$ . Dann wenden wir L'Hospital an

$$R = R \cdot \frac{U_0 \cdot (t - 1)}{U_0 \cdot (t - 1)} = R \cdot \frac{\frac{d(U_0 \cdot (t - 1))}{dt}}{\frac{d(U_0 \cdot (t - 1))}{dt}} = R \cdot \frac{U_0}{U_0} = R$$

Damit ist die hebbare Unstetigkeit behoben und der Widerstandswert ist an allen Stellen der Kennlinie definiert.

## AC /DC

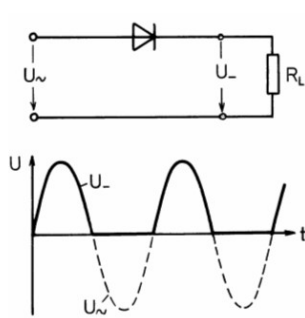
Zeitlich konstante Spannungen werden im deutschsprachigen Raum als Gleichspannung bezeichnet. Dazu gehören auch Spannungen, deren Wert sich ausschließlich durch manuell herbeigeführte Ereignisse verändert, wie Ein- und Ausschaltvorgänge oder manuelle Veränderung der Ausgangsspannung eines Netzgerätes. Im angloamerikanischen Raum heißt diese Spannungsart Direct current, abgekürzt DC. (Die Problematik von Spannung und Strom wollen wir hier großzügig übergehen.)

Zeitlich veränderliche Spannungen werden im deutschsprachigen Raum als Wechselspannung bezeichnet. Im angloamerikanischen Raum heißt diese Spannungsart Alternating current, abgekürzt AC. (Auch hier wollen wir die Problematik von Spannung und Strom übergehen.)

Einrichtungen, die Wechselspannung in Gleichspannung umwandeln, sind in den meisten Fällen einfach aufgebaute nichtlineare Netzwerke aus Dioden und Kondensatoren. Man nennt sie Gleichrichter oder auch AC/DC. [Die im Jahr 1973 gegründete australische Hardrockband ließ sich durch die gleichnamige Aufschrift auf einem Haushaltsgerät zu ihrem Namen inspirieren.](#)

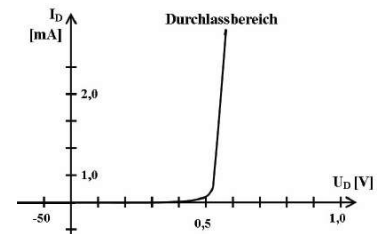
Die Umwandlung von Gleichspannung in Wechselspannung ist technisch weitaus schwieriger, aber aufgrund der hohen Nachfrage beherrscht. Man nennt solche Geräte üblicherweise Wechselrichter. Sie werden vor allem zur Umwandlung der Bordspannungen von Kraftfahrzeugen auf Lichtnetzspannungen eingesetzt. Auch zur Netzeinspeisung der elektrischen Energie aus Solaranlagen sind sie essentiell.

## Einfache Gleichrichterschaltungen



Die Basisanwendung von Dioden ist die Gleichrichtung von Wechselspannung. Hier gibt es wie üblich mehrere Möglichkeiten. Die einfachste Anwendung ist die Einweg – Gleichrichtung ohne Reservoir. Eine ideale Diode vorausgesetzt realisiert diese Schaltung die Funktion

$$\begin{aligned} U_- &= U(t) & \forall u(t) \geq 0 \\ U_- &= 0 & \forall u(t) < 0 \end{aligned}$$

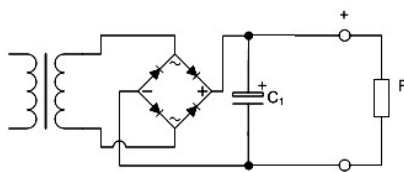


Daher wird (nicht ganz stimmig) die Funktion einer Diode durch das mechanische Äquivalent eines Ventils beschrieben.

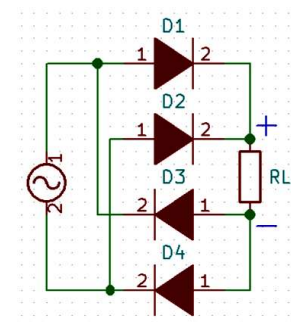
Obige Gleichung ist leider für reale Dioden nicht korrekt: In Durchlassrichtung tritt ein Spannungsabfall auf und auch in Sperr – Richtung fließt ein Strom. Außerdem dauert es eine Zeit lang, bis die Diode vom Durchlassbetrieb in den Sperrbetrieb umschaltet. Bei Gleichrichterdioden steigt der Sperrstrom bei Überschreiten der maximalen Sperrspannung extrem an. Häufig wird die Diode dabei irreversibel geschädigt!

## Brücken – Gleichrichtung

Nach dem deutschen Physiker Leo Graetz, 1856 – 1941 auch Graetz – Schaltung genannt. Das ist die bei weitem am häufigsten verwendete Gleichrichterschaltung bei netzfrequenten Systemen. →

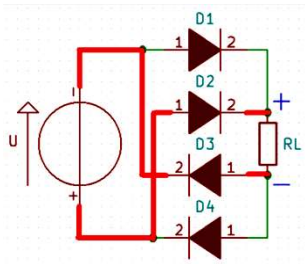
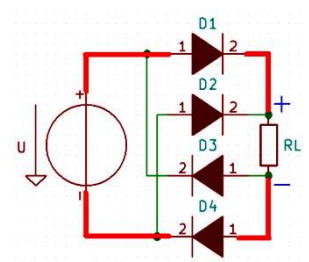


← Manchmal wird sie auch so gezeichnet.  
(Inklusive Transformator als Wechselspannungsquelle und Reservoirkondensator zum Glätten.)



## Die Funktionsweise des Brückengleichrichters versteht Ihr um drei Uhr früh mit vier Promille!

Um einen Gleichrichter zu verstehen, verfolgt man nicht die Spannungen, sondern die Stromflüsse. Während der positiven Halbwelle fließt der Strom vom Pluspol der Spannungsquelle durch Diode D1 an den oberen Anschluss von RL. Der Weg durch D3 ist gesperrt (schau auf die Pfeilrichtung der Diode!). Der Strom fließt weiter durch RL hindurch und durch D4 wieder in die Spannungsquelle zurück. Der Weg durch D2 ist versperrt, da ihre Anode auf niedrigerem Potential liegt als die Kathode.



Während der negativen Halbwelle fließt der Strom vom Pluspol der Spannungsquelle durch Diode D2 an den oberen Anschluss von RL. Der Weg durch D4 ist gesperrt (schau auf die Pfeilrichtung der Diode!). Der Strom fließt weiter durch RL hindurch und durch D3 wieder in die Spannungsquelle zurück. Der Weg durch D1 ist versperrt, da ihre Anode auf niedrigerem Potential liegt als die Kathode.

Der Vorteil des Brückengleichrichters ist die Nutzung beider Stromrichtungen. Nachteilig ist dass die resultierende Gleichspannung um den Spannungsabfall von zwei Diodenstrecken geringer ist als die Spitzenspannung der Wechselspannung und dass die Masse der Ausgangsspannung nicht mit der Masse der Eingangsspannung verbunden werden darf.

## Die Tücken der Masseleitung

Wir wiederholen und erweitern das Thema von Masse und Erde aus dem Repetitorium 3:

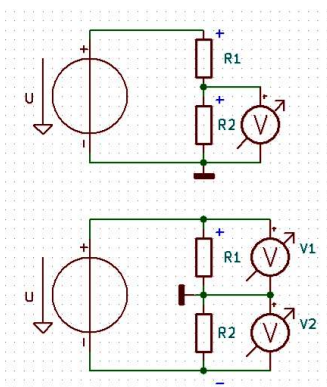
Jedes elektrotechnische System mit mehr als zwei Bauelementen hat eine Masse. Auf welchem Potential diese liegt, legt der Konstrukteur fest, wobei man sich an Gepflogenheiten hält, welche durchaus dem Zeitgeist unterliegen: Heute ist es üblich, dass sich das wesentliche Geschehen zwischen der Masse und einer oder mehreren positiven Spannungen abspielt. Negative Spannungen werden eigentlich nur mehr für manche analogen Systeme verwendet. Als ich jung war, war das umgekehrt: Der positivste Pol der Schaltung war Masse.

Die Erdleitung dient (wenn vorhanden) als Schutz Erde zum Ableiten von im Fehlerfall gefährlichen Fehlerströmen sowie zum Ableiten parasitärer hochfrequenter Ströme bei einigen Arten von getakteten Stromversorgungen. Der Erdanschluss an den üblichen Schukosteckdosen ist der doppelseitige Federkontakt, den man mit bloßen Fingern angreifen kann.



Aufpassen: Jedes Gerät hat eine Masse. Netzbetriebene Geräte können einen Erdanschluss haben, müssen aber nicht unbedingt. Denkt beispielsweise an die Steckernetzgeräte, mit denen Ihr Eure Handys aufladet: Die haben normalerweise keinen Erdanschluss. Bei Geräten mit Netzanschluss mit Erdanschluss kann die Masse mit der Erde verbunden sein, muss aber nicht. Für Euch wichtig ist, dass bei netzbetriebenen Oszilloskopen die Masse mit der Erde verbunden ist. In der Konsequenz kann es geschehen, dass der Anschluss von zwei Geräten, bei denen die Masse intern mit der Erde verbunden ist, an einen Aufbau zu einem Kurzschluss führen kann!

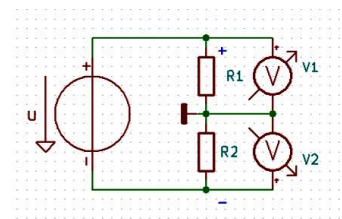
Ein weiterer Aspekt dieses Themas ist die Veränderung der Polarität der Spannung je nach gewähltem Massepunkt:



Bei dieser Schaltung liegt die Masse am Minuspol der Spannungsquelle. Die Ausgangsspannung des Spannungsteilers wird auf die Masse bezogen. Das Voltmeter zeigt eine positive Spannung.

Hier liegt der Massepunkt am Knoten des Spannungsteilers. Die technische Stromrichtung gilt ohne Einschränkung, daher sind die jeweils „oberen“ Anschlüsse der beiden Widerstände positiv gegenüber deren „unteren“ Anschlüssen. Aufgrund der gewählten Polaritäten der Messgeräte zeigen beide positive Spannungen.

Nun haben wir beide Messgerät so geschaltet, dass ihre COM - Anschlüsse am Massepunkt liegen. In der Folge zeigt V1 eine positive und V2 eine negative Spannung.



**Die von einem Messgerät angezeigte Polarität hängt vom Anschluss ab!**

Die Schaltsymbole sehen wie folgt aus:



Masseanschluss, eher im angloamerikanischen Raum. Häufige Bezeichnung COM. (Common).



Masseanschluss, eher im europäischen Raum. Häufige Bezeichnung GND. (Ground). Wenn keine Verwechslungsmöglichkeit besteht, darf der Querstrich auch nur einfache Strichdicke aufweisen.



Schutzleiteranschluss. Häufige Bezeichnungen GE (Ground Earth) und PE (Power Earth).

[Der folgende Text ist teilweise aus [https://de.wikipedia.org/wiki/Masse\\_\(Elektronik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Masse_(Elektronik)) übernommen, Download am 14.04.2020.]

Als Masse (engl. ground, abgekürzt GND) bezeichnet man einen leitenden Körper, dem im Regelfall das Potential null zugeordnet wird, welches das Bezugspotential für alle Signal- und Betriebsspannungen darstellt.

Im Prinzip kann jeder beliebige Knoten einer elektrischen Schaltung Masse sein und als Bezugspotential für die Festlegung aller Spannungen in diesem Netzwerk verwendet werden. („Subjektives Bezugspotential“). Die Masse kann potentialfrei sein, wird aber je nach Erfordernis auch galvanisch (elektrisch direkt) über Schutzleiter mit dem elektrischen Potential des leitfähigen Erdreichs verbunden, was als Erdung bezeichnet wird. („Objektives Bezugspotential“). In älteren Publikationen wird die Masse auch als Signalerde bezeichnet.

Als Erde bezeichnet man das elektrische Potential des leitfähigen Erdreichs. Dieses wird mittels geeigneter Erder (z.B. Fundamente oder Erdspeiß) technisch zugänglich gemacht und mit dem Erdanschluss bzw. Schutzleiter verbunden.

Mit dem Schutzleiter verbundene Kabel müssen im Bereich der Elektroinstallation, des Schaltschrankbaus und des Elektromaschinenbaus mit einer gelb – grünen Isolation gekennzeichnet sein. Anschlüsse des Schutzleiters an ein elektrisch leitendes Gehäuse sind in unmittelbarer Nähe dazu mit Aufklebern mit dem Erdsymbol zu kennzeichnen.

Oft ist der elektrische Minuspol ( – ) der speisenden Spannung zugleich Masse. Der positive Pol der Speisespannung ( + ) sowie alle anderen elektrischen Spannungen und elektrischen Signale einer elektrischen Schaltung beziehen sich auf das Massepotential. Masse ist der gemeinsame Anschluss der meisten Bauelemente. Genauso gut kann der positive Pol der Speisespannung als Massepotential fungieren, die speisende Spannung (auf Masse hin gezählt) ist dann negativ; Beispiele sind weiter unten genannt. Auch bei Wechselstromschaltungen kann ein Massepotential bzw. -anschluss definiert sein, diesen nennt man Neutralleiter N. Dieser durch blaue Isolation gekennzeichnete Leiter ist der Rückleiter für (bei Lichtstrom) den oder (bei Drehstrom) die Stromversorgungsleiter. Er darf keinesfalls mit dem Schutzleiter verbunden oder identifiziert werden!

Elektrisch leitende Gehäuseteile und berührbare Teile elektrischer Einrichtungen mit gefährlichen Spannungen sind entweder mit Schutzleitern miteinander und der Erde (das



Schutzleiternetz der Elektroinstallation oder ein Erder) verbunden oder sie sind durch eine Schutzisolierung sicher galvanisch vom Netz getrennt. (Das Bild ist aus [https://de.wikipedia.org/wiki/Fundamenterder#/media/Datei:Erder\\_fuer\\_Fundament.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Fundamenterder#/media/Datei:Erder_fuer_Fundament.jpg) , Download am 15.04.2020. und zeigt einen Fundamenterder.)

Auch beim Blitzschutz werden relevante Metallteile in die Schutzmaßnahmen einbezogen, d. h. verbunden und geerdet.

Daraus ergibt sich, dass die Signalmasse von Geräten entweder mit dem Schutzleiter verbunden werden muss (z. B. Computer) oder die Geräte eine Stromversorgung besitzen, die sie sicher galvanisch vom Netz trennt (z. B. Audioverstärker).

Oft ist es nicht zweckmäßig, möglich oder erlaubt, Massepotentiale mehrfach direkt mit der Erde zu verbinden. Andernfalls könnten große Ausgleichs- oder Störströme fließen. Bei mehreren Verbindungen entstehen Erdschleifen.

Beim Automobil und auch bei Motor- und Fahrrädern ist das Massepotential die Karosserie bzw. der Rahmen. Als leitfähiges Teil, welches sich über das gesamte Fahrzeug erstreckt, dient es zugleich als Rückleiter für das Bordnetz – zu jedem Verbraucher muss nur eine Leitung verlegt werden. Beim Automobil wird die Masse herstellerübergreifend mit „Klemme 31“ bezeichnet und ist mit dem Minuspol der Batterie verbunden.

Fernmeldetechnische Anlagen wie das Telefonnetz haben aus historischen Gründen oft den Pluspol ihrer Stromversorgungen als Bezugspotential, dieser Pol ist auch geerdet. Die Speisespannung einer Fernmeldeanlage ist z. B. –48 V bzw. –60 V, gemessen gegen Erde.

Auch ältere Elektronikbaugruppen mit Germaniumtransistoren hatten oft den positiven Pol der Speisespannung als Masse. Grund war die vorrangige Verwendung von PNP-Transistoren, deren Emitteranschluss das positivste Potential führt. Heute benutzt man Siliziumtransistoren, die leichter als NPN-Typ zu fertigen sind – damit wurde der Minuspol zur Masse.

Auf Leiterplatten ist das Massepotential der umfangreichste Leiterzug, da daran die meisten Bauteile angeschlossen sind. Oft ist er auch als Fläche über die gesamte Leiterplatte ausgebreitet (Massefläche, Masseebene), um Potentialunterschiede und Störeinflüsse zu vermeiden.

Bei Audio- und Analogschaltungen werden jedoch die Massepunkte der Signal-Ein/Ausgänge sternförmig auf nur einem Knotenpunkt hin miteinander verbunden. Nur dieser Punkt ist das eigentliche Bezugspotential, alle anderen Orte der Masse können aufgrund von Spannungsabfällen infolge von hohen Strömen entlang der Leiterzüge andere Potentiale annehmen, wodurch Störsignale entstehen.

Bei Personal Computern ist das Massepotential zugleich Gehäuse- und Erdpotential.

Bei Hochfrequenzanlagen und -baugruppen ist das Massepotential immer mit dem Gehäuse verbunden. Auch bei Audioverstärkern ist das hilfreich, um Störeinstrahlungen zu vermeiden. In beiden Fällen kann es zu Problemen kommen, wenn diese Signalmasse an mehreren Stellen mit dem Erdpotential verbunden ist (Brummschleife, auch Erdschleife genannt). Gegebenenfalls sind Einrichtungen zu verwenden, die die massebezogenen Signale auf gegenüber der Masse differentielle Signale umwandeln: Trenntransformatoren bzw. Trennübertrager sowie Symmetrierverstärker oder Differenzverstärker. Diese gestatten es, die Signalmasseverbindung zwischen Geräten zu unterbrechen. Bei hohen zu überbrückenden Potentialunterschieden verwendet man optische Systeme wie Optokoppler oder Lichtleiterkabel.



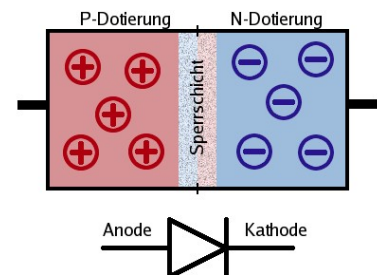
In der Schaltungstechnik (Schaltplan) werden aus Übersichtlichkeitsgründen die Punkte mit Massepotential meist nicht verbunden gezeichnet, sondern jeweils mit einem Massesymbol versehen, das wie ein Signalname später in der realen Baugruppe eine Verbindung symbolisiert. International ist die Gestalt der Schaltzeichen für Masse in einer IEC-Norm festgelegt, die in deutscher Übersetzung als DIN EN 60617-2[3] vorliegt.

## Dioden

Bisher haben wir uns nur mit linearen Bauelementen beschäftigt. Lineare Bauelemente weisen einen im Wesentlichen linearen Zusammenhang zwischen bestimmten elektrischen Größen (meist Strom und Spannung oder deren zeitlichen Ableitungen) unter den spezifizierten Anwendungsbedingungen auf. Beim Betrieb mit Wechselspannung wirkt sich das so aus, dass im Ausgangssignal keine weiteren Frequenzen vorkommen als im Eingangssignal.

Nichtlineare Bauelemente haben eine erwünschte Nichtlinearität. Diese führt zu je nach Betriebsart unterschiedlichen differentiellen Widerständen und beim Betrieb mit Wechselspannung zur Erzeugung zusätzlicher Frequenzen. Auch eine in die Sättigung ausgesteuerte Spule ist streng genommen ein nichtlineares Bauelement!

Eine Diode ist allgemein ein zweipoliges elektrisches Bauelement, das Strom nur in einer Richtung passieren lässt und in der anderen Richtung wie ein Isolator wirkt.



Wie so oft in der Technik ist die Bezeichnung „Diode“ nur schwammig definiert. Üblicherweise bezeichnet man nur als Gleichrichter verwendete Halbleiterdioden mit p-n – Übergang als Diode. Bei sämtlichen anderen nichtlinearen zweipoligen Bauelementen wird die genaue Art des Bauelementes durch einen Präfix beschrieben: Röhrendiode, Schottky – Diode, Zenerdiode, Fotodiode etc.

Die meisten Dioden werden heutzutage aus Silizium hergestellt. Weitere gebräuchliche Werkstoffe sind Siliziumkarbid, Galliumarsenid und in letzter Zeit zunehmend Galliumnitrid. Das früher übliche Germanium ist aufgrund seiner Nachteile, vor allem der geringen Maximaltemperatur inzwischen praktisch Geschichte.

Funktionsweise: Dotierte Halbleitermaterialien sind für sich selbst ungeladen. Werden sie zueinander in Kontakt gebracht, kommt es zum Ladungsausgleich: Löcher strömen in den N – Bereich, Elektronen in den P – Bereich. Die Folge ist allerdings die Ausbildung eines elektrischen Feldes, das der Diffusion entgegen wirkt. Es kommt zur Ausbildung eines räumlich begrenzten Gleichgewichtszustandes, der Sperrschicht. Um weitere Ladungsträger zu bewegen, muss ein äußeres elektrische Feld angelegt werden das stark genug ist, Ladungsträger über den Potentialwall der Sperrschicht zu bewegen: Die Diode wird in Durchlassrichtung betrieben. Die elektrische Wirkung des Potentialwalls ist ein Spannungsabfall, der vom Material, der Geometrie und der Stromstärke abhängt. Bei Siliziumdioden beträgt er etwa 0.7V. Wird die Diode in Sperr – Richtung betrieben, verbreitert sich lediglich die Sperrschicht – die Diode leitet nicht.

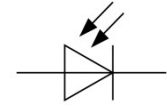
### Konkrete Diodentypen

- Da die Breite der Sperrschicht von der angelegten Spannung abhängt, ändert sich damit ihre Kapazität. So lassen sich elektrisch steuerbare Kapazitäten

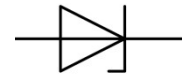


(Kapazitätsdioden, Varicap – Dioden) für elektrisch variable Schwingkreise herstellen. Das ist Stand der Technik. Man erreicht je nach Bauelement Aussteuerungen von 1:10 bei Spannungen zwischen 0 und 30V und einer maximalen Kapazität von 500pF.

- Wird die Sperrschicht von Photonen getroffen, kommt es zur Bildung von Ladungsträgerpaaren. Dieser Effekt kann zur Energieerzeugung (Solarzellen) oder zur Lichtmessung (Fotodiode) herangezogen werden.

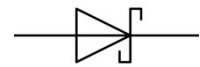


- Macht man die Sperrschicht besonders dünn, dann genügen bereits relativ geringe Feldstärken in Sperr - Richtung, um einen Stromfluss zu erzwingen. Theoretiker unterscheiden den Zenereffekt ( $< 6V$ ), bei dem Elektronen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit aus dem Valenzband ins Leitungsband gelangen können und den Lawinendurchbruch ( $> 6V$ ) mit Stoßionisation. Für den Praktiker heißen all diese Bauelemente Z – Dioden, ohne dass man sich um die zugrunde liegenden Effekte kümmert. Manchmal ist lediglich zu beachten, dass der Zenereffekt einen höheren differentiellen Widerstand ergibt als der Lawineneffekt.

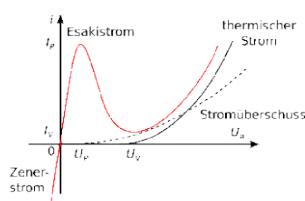


Speziell für hohe Ableitströme ausgelegte Z-Dioden nennt man Suppressordioden, auch Transient Voltage Suppressor Dioden (TVS-Dioden) oder Transil – Dioden. Gegenüber Zenerdioden ist der differentielle Widerstand nahe der Ansprechspannung höher, die Kennlinie ist dort flacher. Sie haben Ableitleistungen bis in den kW – Bereich und eng tolerierte Ansprechspannungen. Sie werden zum Schutz der Ein- und Ausgänge elektronischer Schaltungen vor kurzzeitigen Überspannungsimpulsen verwendet, wie sie durch Schaltvorgänge oder nahe Blitzschläge auftreten. Für die Anwendung in Wechselspannungsnetzen sind sie auch bipolar erhältlich.

- Bei Schottky – Dioden wird der eine Halbleiter durch ein Metall ersetzt. Bei kluger Konstruktion ergeben sich eine Reihe von Vorteilen: Geringerer Spannungsabfall in Flussrichtung (0,2 bis 0,5V), höhere Maximaltemperatur, kürzere Schaltzeiten. Nachteilig ist die bei den Siliziumtypen deutlich niedrigere maximale Sperrspannung von etwa 40V. Dieses Problem konnte erst vor kurzem durch die Einführung der Siliziumkarbid – Typen gelöst werden.

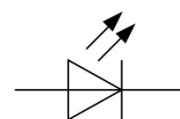


- Tunneldioden (nach ihrem Erfinder auch Esaki – Dioden genannt) bestehen aus einem beidseitig stark dotierten p-n – Übergang. Dabei wird



die Dicke der Sperrschicht auf etwa 10nm reduziert. Es kommt bereits bei niedrigen äußeren Spannungen zum massiven Auftreten von quantenmechanischen Tunnelströmen. In der Folge sinkt der elektrische Widerstand bei steigender Spannung. So ein Kennlinienbereich von negativem differentiellem Widerstand eignet sich hervorragend zur Entdämpfung von Schwingkreisen. Da der zugrunde liegende Effekt quantenmechanisch ist, hat er keine nennenswerte zeitliche Verzögerung. Man kann somit einfach LC – Generatoren bis in den 100GHz Bereich herstellen. In der Praxis sind Tunneldioden nicht mehr erhältlich, vor allem aufgrund ihrer extremen Anfälligkeit.

- Leuchtdioden, auch Lumineszenz – Diode, kurz LED für Light Emitting Diode genannt, strahlen bei Stromdurchfluss in Durchlassrichtung Licht ab. Die Funktion beruht darauf, dass Elektronen aus dem N – Bereich in den P – Bereich kommen und dort mit den Löchern rekombinieren. Die dabei frei werdende Energie liegt bei III-V – Halbleitern im Sichtbaren und nahen Infrarot. Die Wellenlänge ist vom Halbleitermaterial und der Dotierung abhängig. Derzeit sind LEDs in mehreren Stufen zwischen 950nm und 230nm verfügbar. Elementare LEDs sind

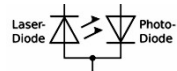




halbwegs monochromatisch mit Bandbreiten von etwa 30nm. Vielfarbige LEDs werden aus je mindestens einem roten, grünen und blauen Emitter in einem Gehäuse hergestellt (RGB – LEDs). Weiße LEDs sind üblicherweise monochromatische blaue LEDs mit vorgesetztem Fluoreszenzfarbstoff.

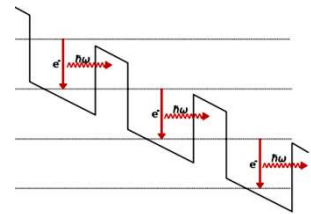
LEDs müssen mit konstantem Strom betrieben werden! Je nach Bauelement betragen die Nennströme 2mA, 20mA, 350mA und 1A. Die Betriebsspannungen sind direkt proportional zur Frequenz des emittierten Lichtes und betragen pro Element etwa 1.1V bei den Infrarottypen und bis zu etwa 4V bei den UV – Typen.

- Die Laserdiode ist in der Funktion der LED ähnlich, allerdings werden die Kristallendflächen verspiegelt (bei den Billigtypen genügt auch der große Abfall des Brechungsindex an der Kante des Halbleiters) und die aktive Zone mit höheren Stromdichten betrieben. Daraus resultiert stimulierte Emission und eine stehende Welle bildet sich aus. Kommerzielle Halbleiterlaser sind derzeit von 1900nm bis 275nm verfügbar. Da die Stabilisierung der Ausgangsleistung wegen der extrem steilen Kennlinie schwierig ist, werden Halbleiterlaser mit eingebauten Fotodioden, sogenannten „Monitordioden“ gefertigt. Deren Ausgangsstrom wird dann als Regelgröße heran gezogen.

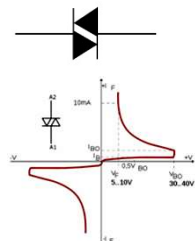


Laserdioden werden vor allem in den Schreib-Lese – Köpfen optischer Laufwerke verwendet. Des Weiteren zur Telekommunikation, in der Sensortechnik sowie zur Unterhaltung. Da bereits hohe Ausgangsleistungen im Bereich von einigen Watt continuous wave serienmäßig erhältlich sind, wird auch an exotischen Anwendungen gearbeitet wie als Ersatz für die Zündkerzen in Otto – Motoren.

- Quanten – Kaskaden – Laser sind Halbleiterlaser für Wellenlängen im mittleren und fernen Infrarot (Terahertzstrahlung). Im Gegensatz zu normalen Halbleiterlasern wird das Laserlicht nicht durch die strahlende Rekombination eines Elektrons des Leitungsbandes mit einem Loch des Valenzbandes des Halbleiters erzeugt (Interband-Übergang), sondern durch Intersubband-Übergänge von Elektronen innerhalb des Leitungsbandes. In der Praxis werden mehrere tausend Einzelübergänge zu einem Laser zusammen gefasst. Quantenkaskadenlaser sind trotz hohem Forschungsaufwand und respektablen Einzelerfolgen noch immer weitgehend experimentell. Einer breiten Anwendung stellen sich nach wie vor hohe Kosten (typisch mehrere tausend € pro Stück) und schlechte Verfügbarkeit entgegen. Man erhofft sich effektivere Lösungen für die chemische Analytik und die Telekommunikation.



- Diacs werden auch Zweirichtungs-Diode genannt. Die Strecke zwischen den Anschlüssen wird erst leitfähig, wenn die Spannung an ihnen die Durchbruchspannung von etwa 33V übersteigt. Die Bezeichnung Diac ist eine Abkürzung und steht für Englisch „Diode for Alternating Current“ (dt. Diode für Wechselstrom). Diacs haben eine völlig andere Kennlinie als die „richtigen“ Dioden. Diacs werden hauptsächlich in Zündschaltungen eingesetzt, um einen Zündimpuls mit sehr steiler Flanke zu erzeugen. Handelsüblich sind nur wenige Typen.

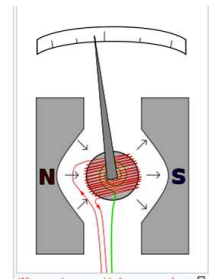


# Das Multimeter

Das elektronische Vielfachmessgerät, auch Multimeter genannt, ist eines der wichtigsten Arbeitsmittel des Elektrotechnikers. Die Geschichte der elektrischen Messgeräte begann gleich am Anfang des 19. Jahrhunderts. Zuerst fand der Italiener Romagnosi bereits um 1802 einen Zusammenhang zwischen Elektrizität und Magnetismus. Dessen Beobachtungen gerieten allerdings in Vergessenheit. Der dänische Physiker und Chemiker Hans Christian Ørsted kam im Jahr 1820 wiederum auf diesen Zusammenhang: Er beobachtete die Auslenkung magnetischer Kompassnadeln in der Nähe stromdurchflossener Leiter. Diese Anordnung wurde später (zu Ehren des Italieners Luigi Galvani, das war der mit den Froschschenkeln) Galvanometer genannt. Noch als ich ein Bub war, wickelten wir mehrere Dutzend Windungen lackisolierten Kupferdraht auf zwei Träger aus Holz oder Plastik, stachen eine Nadel in ein Stück dazwischen montieren Karton und legten auf die Nadelspitze eine Kompassnadel. Mit einem ausgeborgten Messgerät wurde dann die Auslenkung der Nadel durch einen bekannten Strom auf dem Karton markiert. Dieses Verfahren war auch für Buben aus der Vorstadt finanzierbar und lieferte brauchbare Schätzungen. (Foto aus <https://picclick.de/Galvanometer-aus-altem-Kosmos-Experimentierkasten-312135586207.html>, Download am 15.04.2020.)



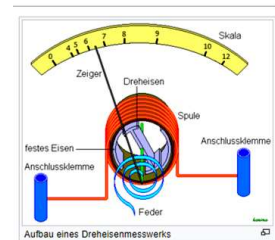
Im Jahr 1888 entwickelte Edward Weston dieses Prinzip zum bis heute verwendeten Drehspulmesswerk weiter. Dieses ist extrem empfindlich und nicht vom Erdmagnetfeld abhängig. Wie das Galvanometer ist es polaritätsabhängig und für Wechselspannung nicht direkt zu gebrauchen.



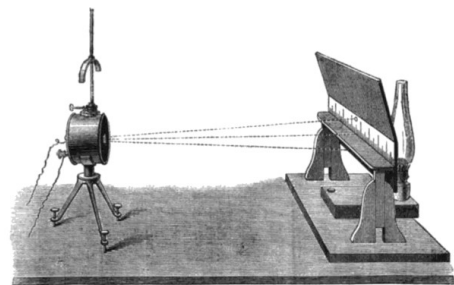
Das Bild zeigt deutlich, wie das durch die stromdurchflossene Spule erzeugte Magnetfeld gegen das Feld des umgebenden Permanentmagneten eine Kraft ausübt, die wiederum gegen die Rückstellkraft einer Ringfeder gerichtet ist. (Foto aus <https://en.wikipedia.org/wiki/Ammeter>, Download am 15.04.2020.)

Ersetzt man (vereinfacht) den Magneten des Drehspulmesswerkes durch ein Stück Weicheisen, ist die Auslenkung von der Polarität unabhängig und man kann mit einem robusten und einfachen Gerät Wechselstrom messen. Allerdings ist die Skalenteilung nicht linear. Wenn niedriger Preis und Robustheit wichtig sind, verwendet man dieses Dreheisenmessgerät auch heute oft und gerne.

(Foto aus <https://de.wikipedia.org/wiki/Dreheisenmesswerk>, Download am 15.04.2020.)



Mittels Vor- und Parallelwiderständen lässt sich jedes Drehspul- oder Dreheisenmesswerk zu einem vollwertigen analogen Vielfachmessgerät erweitern. Anfangs sowie in Billiggeräten gab es für jeden Messbereich eine Buchse, später wurden Messbereichsumschalter eingeführt, welche die Handhabung deutlich erleichterten. Bis in die 1970er Jahre waren diese Geräte völlig ausgereift und weit entwickelt. Vom Prinzip her nicht zu beheben war das Problem der mangelnden Auflösung: Normale Vielfachmessgeräte brachten (gute Augen vorausgesetzt) bestenfalls 0,5% (bei 2% Genauigkeit). Superteure Spiegelgalvanometer waren zwar besser, aber extrem empfindlich gegen jede Art von Misshandlung und erforderten Räume mit an der Wand angebrachter Skala.



(Foto aus [https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Thompson\\_mirror\\_galvanometer\\_use.png](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Thompson_mirror_galvanometer_use.png), Download am 15.04.2020.)

Etwa ab dem Ende der 1970er Jahre kamen die Digitalvoltmeter und damit sofort die Digital – Multimeter auf den Markt und verdrängten die analogen Geräte nahezu vollständig. Der einzige verbliebene Vorteil der Analoggeräte, die intuitive Erkennung von Auslenkung und Trends, wurde durch Analogbalken bei vielen Digitalmultimetern ausgeglichen. Heute sind Analogmultimeter außerhalb des Lehrmittelsektors Exoten. Drehspul- und Dreheisenmesswerke mit einem festen Messbereich findet man als Schalttafel – Messgeräte noch recht häufig, da sie auch aus der Entfernung leicht ablesbar, billig und robust sind und keine zusätzliche Energieversorgung benötigen.

Durch die weite Verbreitung der Digitalmultimeter gibt es eine unüberschaubare Vielzahl und Typen mit unterschiedlichen Funktionen, die sich an unterschiedliche Zielgruppen wenden.

[Der folgende Text ist teilweise aus <https://de.wikipedia.org/wiki/Digitalmultimeter> übernommen, Download am 14.04.2020.]

Ein Digitalmultimeter (DMM) ist in der Elektrotechnik ein Messgerät mit Ziffernanzeige, das zum Messen verschiedener elektrischer Messgrößen verwendet wird. Die drei Messgrößen elektrische Stromstärke, elektrische Spannung und ohmscher Widerstand können mit fast allen Digitalmultimetern ermittelt werden. Weitere Messgrößen sind teilweise die elektrische Kapazität oder die Induktivität eines Bauteils. Viele Multimeter bieten außerdem eine Funktion zum Testen von Transistoren oder Dioden. Mit Hilfe eines externen Sensors können manche Geräte die Temperatur messen.

Es arbeitet mit einem elektronischen Analog-Digital-Umsetzer (ADU, engl. ADC) und zeigt den Messwert mit einer LED- oder Flüssigkristallanzeige in Dezimalzahlen an. Ein DMM benötigt zu seiner Funktion elektrische Energie. Diese wird meist durch Batterien oder Akkus zur Verfügung gestellt. Es gibt aber auch Digitalmultimeter, die mit Solarenergie oder über ein Netzteil aus dem Stromnetz versorgt werden. Manche Geräte ermöglichen eine Datenübertragung auf einen Rechner mittels einer (aus Sicherheitsgründen optisch getrennten) seriellen Schnittstelle. Um die Vorteile einer Anzeige mit einer Skalanzeige zu erhalten, sind einige DMM zusätzlich mit einer Balkengrafik ausgestattet.

Digitalmultimeter gehören zur Grundausstattung einer Elektronik – Werkstatt. Außerdem kommen sie bei der Elektroinstallation zum Einsatz.

Ein digitales Multimeter kann verschiedene elektrische Größen messen. Üblich sind Spannung, Stromstärke (jeweils Gleich- und Wechselgröße) und Widerstand. Die Umschaltung der Messgrößen (Messarten) und Messbereiche erfolgt meist mechanisch. Hochwertige DMM wählen den Messbereich selbst, können sich gegen Überlastung und Überspannungen schützen und messen Wechselgrößen als Effektivwert.

Man unterscheidet grundsätzlich

o) Geräte, die in der Hand gehalten werden können, auch wenn sie oft zusätzlich einen einfachen Klappbügel zum Aufstellen an der Geräterückseite besitzen von



o) Tischgeräten, die ausschließlich zum Aufstellen geeignet sind und oft auch zu groß sind, um in der Hand gehalten zu werden.



Tischgeräte sind im Allgemeinen technisch besser als die Handgeräte, wobei heutzutage der Unterschied zunehmend verschwindet. Tischgeräte sind meist auch für den Betrieb am Lichtstromnetz ausgelegt, während die Handgeräte normalerweise mit Batterien oder auch

Akkumulatoren ausgestattet sind. Der bei einigen wenigen Geräten propagierte Betrieb mit Solarzellen sollte bezüglich der praktischen Brauchbarkeit kritisch hinterfragt werden.

Der Anzeigebereich der Digitalmultimeter wird üblicherweise als Stellenzahl dargestellt. Wie so oft gibt es dabei gewisse Unschärfen: Erstens wird die Symmetrie immer vorausgesetzt, niemand schreibt beispielsweise  $\pm 3,5$  Stellen. Des Weiteren ist zwar eindeutig, dass 0,5 Stellen immer eine 2 als Mantisse meint,  $\frac{3}{4}$  Stellen aber können zwischen 3 und 6 alles bedeuten. Beispiele:

3,5 Stellen	= Anzeigebereich $\pm 2000$
4 $\frac{3}{4}$ Stellen	= Anzeigebereich zwischen $\pm 30000$ und $\pm 60000$
6,5 Stellen	= Anzeigebereich $\pm 2 \cdot 10^6$

Die Umschaltung der Messart (also Spannung, Strom, Widerstand etc.) sowie die Umschaltung zwischen AC und DC erfolgt meist mittels Drehschaltern, seltener mit Drucktastenaggregaten oder Softkeys.

Die Messbereichsumschaltung wird entweder mit Drehschaltern ausgeführt, wobei ein zentraler Drehschalter in der ungefähren Mitte des Gerätes nahezu Standard ist, bessere Geräte können auch den Messbereich selbstständig wählen. Das nennt man Autorange.

## Die Spannungsmessung mit dem DMM

Nahezu sämtliche Multimeter sind nicht für höhere Spannungen verwendbar! Auch bei den als „isolierend“ gedachten Handgeräten darf die maximale Eingangsspannung in allen Messbereichen sowohl zwischen den Eingängen als auch gegen das Erdpotential niemals höher als 1000V Gleichspannung (DC) und 700V Wechselspannung (AC) betragen. Vor allem billige Geräte sowie Lehrmittelgeräte haben manchmal sogar weitaus niedrigere Maximalspannungen! Zur Messung höherer Spannungen sind eigene Vorschaltssysteme wie beispielsweise Hochspannungstastköpfe zu verwenden.

Der kleinste Messbereich reicht überwiegend bis  $\pm 200\text{mV}$ . Standardgeräte lösen einen Messbereich in  $\pm 2000$  Messpunkte auf, damit beträgt der kleinste Messschritt  $100\mu\text{V}$ . Höherwertige Geräte können um eine oder gar mehrere Zehnerpotenzen feiner auflösen. Mit unter 200€ einigermaßen finanzierbar sind derzeit (2020) Geräte mit  $\pm 60000$  Messpunkten (Auflösung  $1\mu\text{V}$ ) als Handgerät. Für Tischgeräte mit  $\pm 2 \cdot 10^6$  Messpunkten legt man schnell fast 1000€ ab, die besten Geräte mit  $\pm 2 \cdot 10^8$  Messpunkten kosten über 10000€. Richtige Messungen von Spannungen unter  $100\mu\text{V}$  sind extrem schwierig und erfordern viel Erfahrung und experimentelles Geschick.

Der Eingangswiderstand liegt typisch in allen Spannungs – Messbereichen bei  $1\text{M}\Omega$  bis  $10\text{M}\Omega$ , parallel dazu ist von einer Eingangskapazität von etwa 70 bis  $100\text{pF}$  auszugehen. Bessere Geräte haben für einen begrenzten Eingangsspannungsbereich, meist  $\pm 2\text{V}$ , höchstens  $\pm 12\text{V}$  eine zuschaltbare Funktion um den Eingangswiderstand auf  $1\text{G}\Omega$  bis  $1\text{T}\Omega$  zu erhöhen. Manchmal heißt diese Funktion Hi-Z für „hohe Impedanz“. Geräte für den Einsatz im Bereich der Elektroinstallation haben manchmal auch eine Lo-Z Funktion zum Absenken des Eingangswiderstandes, um nicht durch eingestreute Spannungen genarrt zu werden, welche zwar Spannungen sind, aber dermaßen wenig belastbar, dass sie für den Elektromonteur irrelevant sind.

## Die Strommessung mit dem DMM

Zur Strommessung wird die Spannung über einem eingebauten Messwiderstand gemessen – je nach Einstellung als Gleich- oder Wechselspannung. Dessen Wert ergibt sich (Ohmsches Gesetz) zu „kleinster Spannungsmessbereich geteilt durch eingestellter Strommessbereich.“ Beispiel: Im Strommessbereich  $200\mu\text{A}$  beträgt der Eingangswiderstand  $200\text{mV} / 200\mu\text{A} = 1\text{k}\Omega$ . Dazu kommen meist noch ein paar Zehntelohm für die Schutzschaltung. Die meisten DMM sind daher anderen Strommessverfahren unterlegen, die mit wesentlich geringerem Spannungsabfall auskommen.

Übliche Multimeter können maximal 10A messen und das meist nur eine begrenzte Zeit hindurch, meist nur wenige Minuten, sonst wird der Messwiderstand zu heiß. Zur Messung großer Stromstärken etwa ab 10A wird statt des Spannungsabfalls am Messwiderstand das den Stromleiter umgebende elektromagnetische Feld erfasst. Dazu gibt es Strommesszangen mit Messbereichen ab etwa 10mA bis etwa 1000A. Die Vorteile der Strommesszange bestehen darin, dass man den Leiter zur Messung nicht auftrennen muss, und in der galvanischen Trennung. Zu beachten ist, dass zwar sämtliche Strommesszangen Wechselstrom von etwa 50Hz messen können, aber nur wenige Typen Gleichstrom oder höhere Frequenzen! Des Weiteren liegt die tatsächlich erzielbare Genauigkeit in der Region von 1,5%.



Manche hochpreisige Tischgeräte verwenden entweder elektronische Verstärker, um mit niederohmigen Messwiderständen auszukommen oder Transimpedanzverstärker, welche auch bei empfindlichen Strommessbereichen differentielle Widerstände im Bereich von Milliohm aufweisen, dafür aber bei Messungen an Quellen mit niedrigeren Innenwiderständen fatale Probleme haben.

Eine weitere Möglichkeit zur Strommessung ist die Verwendung externer zusätzlicher hochbelastbarere Messwiderstände, sogenannter Shunts. Sie haben je zwei Anschlüsse für den Strom und die zu messende Spannung (Kelvin – Kontakt). Da sie keine begrenzte Größe haben, werden sie auch für sehr hohe Ströme gebaut. Sie messen genauer als die Stromzangen, beherrschen Gleichstrommessungen ohne Einschränkungen und haben nur minimale Probleme bei höheren Frequenzen. Das Messgerät ist allerdings galvanisch mit dem Stromkreis verbunden, der zur Messung auch geöffnet werden muss.



(Foto aus [www.beardstownwnn.ga](http://www.beardstownwnn.ga), Download am 14.04.2020.)

## Die Widerstandsmessung mit dem DMM

Die Messung von Widerständen geschieht bei den Billigtypen durch Vergleich des Spannungsabfalls an einem internen, sehr genau bekannten Widerstand, mit dem Spannungsabfall am unbekannten, zu messenden Widerstand bei gleichem (nicht bekannten – das ist der Vorteil!) Strom. Teure Geräte besitzen eine hochpräzise Konstantstromquelle, deren Ausgangsstrom am zu messenden Widerstand den gesuchten Spannungsabfall ergibt. Der niedrigste Messbereich ist bei nahezu allen Geräten  $200\Omega$ , der höchste bei den Billiggeräten  $2\text{M}\Omega$ , bei den teuren Geräten kann er bis in den  $\text{T}\Omega$  Bereich reichen. Der Spannungsabfall bei der Widerstandsmessung bleibt normalerweise unter  $200\text{mV}$ . Daher werden LEDs oder Siliziumdioden nicht erkannt.

Zur Bestimmung des Spannungsabfalls solcher Dioden in Flussrichtung haben die meisten Geräte eine eigene Diodentest – Funktion. Sie wird mit dem Schaltsymbol für die Diode

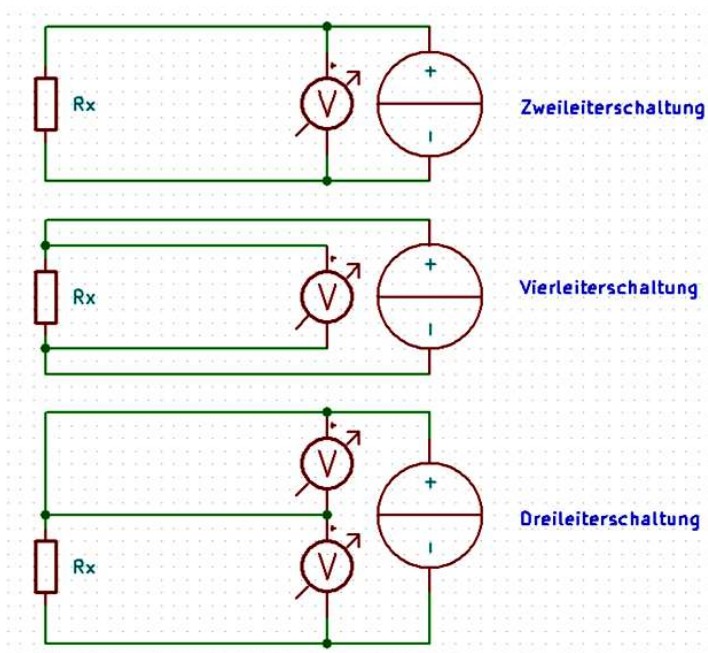


gekennzeichnet. Dabei wird ein Strom von sehr ungefähr 1mA durch das zu messende Bauteil geschickt und der Spannungsabfall gemessen. Im Gegensatz zu den etwa 200mV bei der Widerstandsmessung können in dieser Betriebsart je nach Gerät Spannungsabfälle von mehreren Volt gemessen werden. Damit kann auch die Funktionsfähigkeit von Gleichrichterdiolen und LEDs beurteilt werden.

Leitungswiderstände sind bei Widerstandsmessungen im Ohm – Bereich oder gar darunter ein nicht zu unterschätzendes Problem. Je nach Art der Verbindungsleitungen sowie dem Innenaufbau des Multimeters können Fehler zwischen einigen Dutzend Milliohm und 30 Ohm auftreten!

**Vor der Messung daher einmal testweise die Anschlüsse der Verbindungsleitungen kurzschließen und den resultierenden Messwert beurteilen!**

Zur Elimination dieses Problems wird die Vierleiterschaltung, auch Kelvin – Kontakt genannt, verwendet.



Bitte vergleiche die Schaltungen: Die einfachste Methode ist die Zweileiterschaltung. Stromquelle und Spannungsmessgerät befinden sich am Leitungsende, der zu messende Widerstand wird über ein Leitungspaar angeschlossen. Das System ist einfach und bequem, eventuelle Leitungswiderstände gehen aber voll in das Messergebnis ein.

Bei der Vierleiterschaltung werden Stromquelle und Spannungsmessgerät über getrennte Leitungspaare mit dem zu messenden Widerstand verbunden. Die Stromquelle muss zwar eine höhere Spannung liefern als nur für den Widerstand allein, aber darauf kann man sie leicht auslegen. Und das Spannungsmessgerät hat unendlichen Innenwiderstand, daher interessieren Leitungswiderstände auf dem Spannungspfad nicht. Die Messung ist genau, benötigt aber eine entsprechende Einrichtung und vier Messleitungen. Manche Tischmultimeter haben eine solche Einrichtung, sie wird üblicherweise mit 4W (4 Wire) gekennzeichnet, im Gegensatz zur Zweileiterschaltung 2W (2 Wire).

Im Bereich der Messung der Widerstände resistiver Sensoren, beispielsweise der weit verbreiteten Pt100 – Temperaturfühler, ist die Dreileiterschaltung üblich. Dabei wird der Masseanschluss von Stromquelle und Spannungsmessgerät gemeinsam genutzt, die „obere“ Leitung wird hingegen getrennt geführt. Mit einem eigenen Messgerät wird der Spannungsabfall „oben“ bestimmt. Der tatsächliche Messwert ist dann der Messwert des unteren Messgerätes minus dem Fehler oben.

## Anschlüsse

Der Anschluss der zu messenden Größe erfolgt in der überragenden Zahl der Geräte an 4mm Laborbuchsen, sogenannten Bananenbuchsen.



Lediglich bei einigen Billigst – Typen sowie einigen speziellen Geräten für den Elektroinstallateur und den Automobilelektriker sind die Anschlußleitungen fest am Gerät verbaut. Als ich jung war, waren die Verbindungskabel mit Bananensteckern ausgestattet, deren Kontaktflächen frei zugänglich waren. Damit bestand immer die Gefahr von versehentlichen Kurzschlüssen oder Kontakt von Personen mit spannungsführenden Anschlüssen. Umgekehrt wurde damals von jedem Techniker erwartet, die Geräte entsprechend zu handhaben und auf seinen persönlichen Schutz zu achten. Und wegen einiger betriebsbedingter Ausfälle von Mitarbeitern machte man damals auch keinen Aufstand.



Später wurde das anders und es wurden Bananenstecker mit einer isolierenden Schutzhülse eingeführt, sogenannte Sicherheitsstecker. Dazu war dann auch eine neue Generation von Bananenbuchsen nötig, welche eine breitere Öffnung oder einen zusätzlichen Isolerring hatten, um die Schutzhülse aufzunehmen: Die Sicherheitsbuchsen. Diese Familie von Steckverbindern ist heute weitgehend Standard.



Ein Stecker ist ein Männchen, eine Buchse ist ein Weibchen. Im High End Bereich gibt es auch kombinierte Steckverbinder mit mehreren Kontakten, von denen einige Männchen und einige Weibchen sind. Solche Systeme nennt man hermaphroditisch.

Die Bezugsleitung ist schwarz (früher blau) und mit COM (engl. Common) oder seltener GND (engl. Ground) gekennzeichnet. Die spannungsführende Messleitung ist rot. Alle anderen Farben sind willkürlich zu verwenden, bei komplizierten Aufbauten sollten zur Verhinderung von Verwechslungen möglichst viele Farben verwendet werden.

Übliche Multimeter haben zwei bis vier Anschlussbuchsen, die teuren Tischgeräte auch mehr. Vor Benutzung ist unbedingt zu lesen, welche Anschlussbuchsen für welches Messproblem zu verwenden sind!

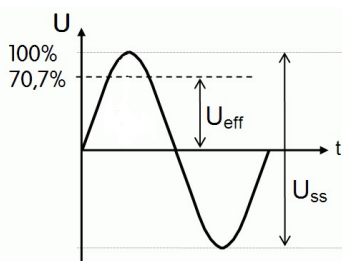
Auf der anderen Seite des Anschlusskabels ist normalerweise ebenso eine Bananenbuchse oder Sicherheitsbuchse montiert. Auf diese können beispielsweise Krokodilklemmen, entweder blank oder mit Isolation (Isolierklemme) sowie Abgreifklemmen oder Messspitzen (auch Prüfspitzen genannt) aufgesteckt werden. Deren Verwendung ist an sich intuitiv, es ist aber ratsam, die korrekten Bezeichnung zu kennen.



## Quantifizierung von Wechselspannung

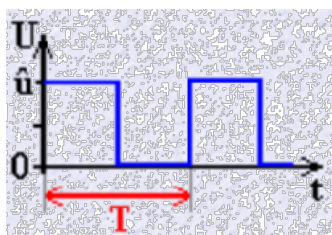
Zur Messung von Wechselspannung bzw. Wechselstrom sind einige grundlegende Vorbemerkungen erforderlich: Was eine Gleichspannung per Definition ist, ist eindeutig, fraglich sind lediglich technische Details wie Genauigkeit oder Belastung. Was eine Wechselspannung ist, darüber gibt es prinzipiell unterschiedliche Konzepte, welche auch unmittelbar mit den Bedürfnissen der einzelnen elektrotechnischen Interessengebiete (z.B. Elektromaschinenbau, Telekommunikation) verbunden sind!

Die zu untersuchende Wechselspannung gehorche der allgemeinen Funktion  $U = f(t)$ . Dann ist die grundsätzlichsste Quantifizierung dieser Wechselspannung die Messung der Momentanwerte. Man erhält eine Folge von Messwerten als Funktion der Zeit, die die Spannung (im Rahmen der technischen Möglichkeiten und unter Beachtung einiger Randbedingungen) genau beschreibt. Dieses Verfahren ist technologisch seit Ende der 1970er Jahre möglich und ist längst die Standardmethode in der digitalen Messtechnik, vielen Steuerungs- und Regelungssystemen sowie nahezu der gesamten Audio- und Videotechnik. Will man die Daten für den Menschen lesbar erhalten, verwendet man Oszilloskope oder lässt sich die Datenströme durch geeignete Software beginnend mit elementaren Spreadsheet – Programmen aufbereiten.



Um die technischen Möglichkeiten von Übertragungsstrecken bzw. der Analog – Digital – Wandler möglich effektiv auszuschöpfen, ist man interessiert, den minimalen und den maximalen Funktionswert vor der Wandlung zu kennen.

Meist lässt sich eine bekannte Gleichspannung vor der Wandlung addieren, sodass der absolute Wert nicht von besonderer Bedeutung ist. Daher misst man die Differenz zwischen dem minimalen und dem maximalen Funktionswert und nennt diesen Spannungswert den Spitze – Wert. Er wird zur sicheren Unterscheidung in  $V_{ss}$  (englisch  $V_{pp}$ ) angegeben.



Bei vielen Wechselspannungen weiß man aufgrund der verwendeten Technologie, dass der Momentanspannungswert niemals einen bestimmten Minimalwert (üblicherweise 0V) unterschreiten kann. In diesen Fällen spart man sich die Bestimmung des Minimalwertes und gibt nur den Maximalwert an. Dieser Spitzenwert  $\hat{u}$  wird zur sicheren Unterscheidung in  $V_s$  bzw.  $V_p$  angegeben.

Die Messung des Spitzenwertes sowie des Spitze – Spitze – Wertes ist technologisch nicht überragend aufwändig, wird aber nur in der Signalverarbeitung benötigt. Deren Messung erfolgt daher üblicherweise am Oszilloskop oder mit eigens dafür gestalteten Schaltungen. In Handmultimetern sind diese Messungen nicht vorgesehen.

Für den Techniker oder die Technikerin der / die sich mit den thermischen, mechanischen oder optischen Anwendungen der Elektrizität beschäftigt, sind obige Messwerte nicht praktikabel. Hier geht es in erster Linie um die Quantifizierung der Wirkung einer Wechselspannung. Dazu verwendet man die Definition des Effektivwertes: Der Effektivwert einer Spannung  $U_{eff}$  ist der Spannungswert, der unabhängig von der Kurvenform in einem Widerstand  $R$  eine Wärmemenge

$$P = \frac{U_{eff}^2}{R}$$

freisetzt. Intuitiv dargestellt:  $1V_{eff}$  erwärmen einen  $1\Omega$  Widerstand mit einer Leistung von  $1W$ , unabhängig davon ob diese Spannung Gleichspannung, sinusförmige Wechselspannung, Rechteck oder gar Rauschen etc. ist. Statt der bisher verwendeten „direkten“ Spannungsmessung muss man also zumindest mathematisch den Umweg über die Leistung nehmen. Aus der bekannten Grundformel

$$P = U \cdot I$$

wird bei zeitlich veränderlichen Spannungswerten  $u(t)$  und Stromwerten  $i(t)$  (beachte die Kleinschreibung bei den Momentanwerten!) das Integral

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) i(t) dt$$

$u(t)$  ist die Momentanspannung als Funktion des Zeitpunktes.

$T$  ist die gesamte Messzeit

$dt$  ist die Messdauer pro Datenpunkt

$t_0$  ist der Anfangszeitpunkt der Messung – normalerweise 0.

Da das ohmsche Gesetz auch momentan gilt, setzt man  $i(t) = \frac{u(t)}{R}$

und natürlich gilt auch weiterhin  $P = \frac{U_{eff}^2}{R}$

Nun führt man diese drei Ausdrücke zusammen:

$$P = \frac{U_{eff}^2}{R} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \frac{u(t)}{R} dt = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \frac{u(t)^2}{R} dt = \frac{1}{T \cdot R} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t)^2 dt$$

$R \neq 0$  kürzt sich heraus und da  $U_{eff} \geq 0$  sein muss, darf man bedenkenlos radizieren:

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} (u(t))^2 dt}$$

Im angloamerikanischen Raum wird der Effektivwert aufgrund dieser Berechnungsweise üblicherweise als RMS (Root – Mean – Square) bezeichnet.

Manche/r wird die Formel zu der der Standardabweichung

$$s_x^* := \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

verdächtig ähnlich finden, wenn man den Mittelwert Null setzt. Aus diesem Grund wird der Effektivwert im angloamerikanischen Raum hier und da auch einmal als „standard deviation“ bezeichnet. Sogar im deutschsprachigen Raum hört bzw. liest man sehr selten bereits die Bezeichnung „Standardabweichung“ für den Effektivwert.

Diese Messmethode ist noch gar nicht so lange technisch möglich, also musste man sich mit einem Trick behelfen: Wenn man (was in der klassischen Elektrotechnik zulässig ist) annimmt, ausschließlich Sinusspannungen ohne überlagerte Gleichspannung zu messen, kann man die Messung des Effektivwertes auf die technisch einfache Messung des Betragsmittelwertes zurückführen: Man richtet die Spannung gleich und überlässt die Mittelwertbildung der mechanischen Trägheit des Messwerkes.

$$U_{BMW} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} |u(t)| dt$$

Dabei ist lediglich der Umrechnungsfaktor von 1.11 zu beachten. Das war's.

Die 1.11 kommen daher, weil der Effektivwert einer 2Vss Sinusspannung  $= \frac{\sqrt{2}}{2} \sim 0.707$  V und der Betragmittelwert  $= \frac{2}{\pi} \sim 0.637$  V betragen. Daher zeigt ein unkorrigiertes Betragsmittelwertmessgerät zu wenig.

Begründung:

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} (u(t))^2 dt}$$

für eine volle Sinusschwingung mit 1Vs (2Vss) zwischen 0° und 360° (2π) also

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left( \frac{t}{2} - \frac{\sin(2t)}{4} \right) \Big|_0^{2\pi}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{2\pi}{2}} = \sqrt{\frac{1}{2}} \sim 0,707$$

Beim Betragsmittelwert, wieder für eine ganze Sinusschwingung zwischen 0° und 360° (2π) also

$$U_{BMW} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |\sin(t)| dt = \frac{2}{2\pi} \int_0^{\pi} \sin(t) dt = \frac{1}{\pi} (-\cos(t)) \Big|_0^{\pi} = \frac{1}{\pi} (-\cos(\pi) + \cos(0))$$

$$U_{BMW} = \frac{1}{\pi} (\cos(0) - \cos(\pi)) = \frac{1}{\pi} (1 - (-1)) = \frac{2}{\pi} \sim 0,637$$



So funktionieren praktisch alle analogen Multimeter und viele einfachen Digitalmultimeter. Beim Digitalmultimeter wird die Mittelwertbildung mit einem kleinen Kondensator ausgeführt. Aufgrund kleiner technischer Details klappt diese Methode bis zu einigen hundert Hz gut, dann sinkt die Messgenauigkeit bei vielen Geräten dramatisch ab.

Wirklich schlimm wird es, wenn die Grundannahme nicht mehr stimmt, es handle sich um eine Sinusspannung. Dann kann es ganz schöne Messfehler geben, wie folgende Tabelle zeigt:

**Table I. Error Introduced by an Average Responding Circuit When Measuring Common Waveforms**

Waveform Type 1 Volt Peak Amplitude	Crest Factor ( $V_{\text{PEAK}}/V_{\text{rms}}$ )	True rms Value	Average Responding Circuit Calibrated to Read rms Value of Sine Waves Will Read	% of Reading Error* Using Average Responding Circuit
Undistorted Sine Wave	1.414	0.707 V	0.707 V	0%
Symmetrical Square Wave	1.00	1.00 V	1.11 V	+11.0%
Undistorted Triangle Wave	1.73	0.577 V	0.555 V	-3.8%
Gaussian Noise (98% of Peaks <1 V)	3	0.333 V	0.295 V	-11.4%
Rectangular Pulse Train	2 10	0.5 V 0.1 V	0.278 V 0.011 V	-44% -89%
SCR Waveforms 50% Duty Cycle 25% Duty Cycle	2 4.7	0.495 V 0.212 V	0.354 V 0.150 V	-28% -30%

Ein wichtiges Maß für die zu erwartenden Messfehler ist der Crest – Faktor. Er ist der dimensionslose Quotient aus Spitzenspannung  $V_s$  (nicht  $V_{ss}$ !) und Effektivwert  $V_{\text{eff}}$ .

Richtwert: Auch gute True – RMS – Messgeräte steigen bei Crest – Faktoren ab 5 aus. Die Spannungsmessung solcher Signale sollte ausschließlich über punktweise Digitalisierung und anschließende Mathematik erfolgen. Datenlogger für langsame Signale und Digitiser bzw. Oszilloskope für schnelle Signale können das oft selbst, sonst beispielsweise in Excel® importieren und umrechnen lassen.

Daher sollte man sich vor dem Messen vergewissern, dass das verwendete Messgerät für diesen Einsatz wirklich geeignet ist.

Noch einmal zusammengefasst:

- Für echte Sinusspannungen im Frequenzbereich 20...200Hz ist jedes Messgerät geeignet, das überhaupt einen Wechselspannungsmessbereich hat.
- Ansonsten benutze man ausschließlich Messgeräte mit der Angabe „True RMS“! Vorsicht Falle! Gewiefte Verkäufer preisen Gerät mit Betragsmittelwertmessung als „RMS – Meter“ an, da es unter den bekannten Voraussetzungen schließlich tatsächlich RMS misst. Also vor dem Kauf wirklich auf das „True“ achten. Natürlich zahlt Ihr für die schwierigere Technologie ein paar Euro drauf, aber das lohnt sich!
- Speziell bei Frequenzen über 20kHz vergewissere man sich aus dem Datenblatt oder besser eine Kontrollmessung, ob gegenständliches Messgerät noch richtig zeigt.

- Bei hohen Crestfaktoren  $>5$  – vergiss Multimeter!

Eine wichtige Faustregel zum auswendig merken:  $1V_{\text{eff}} \approx 3V_{\text{ss}}$  (bei Sinusspannung).

(Gemäß der alten Faustregel  $e = 2 \cdot \sqrt{2} = \pi = 3$ . Natürlich klingt das bescheuert, aber der Fehler bleibt unter  $\pm 10\%$ !)

Teilweise zeigen Digitalmultimeter im Wechselspannungsbereich auch bei Mischspannungen, also bei Spannungen, die einen Gleichanteil und einen Wechselanteil enthalten, ausschließlich den Wechselanteil an. Teilweise kann zwischen den zwei Möglichkeiten „AC“ oder „AC+DC“ gewählt werden. Ist das nicht der Fall, muss man experimentell oder durch Studium der Bedienungsanleitung feststellen, ob Mischspannung oder ihr Wechselanteil gemessen wird.

Infolge nicht vollständiger Glättung bei der Gleichrichtung oder Effektivwertbildung ergeben sich zuverlässige Messwerte nur bei einer Integrationsdauer, die eine ganze (oder sehr große) Anzahl von Perioden der Wechselspannung überdeckt. Zur wirksamen Störunterdrückung bei Netzfrequenz ist eine Integration über 100ms (5 Perioden bei 50Hz [europäische Netze] oder 6 Perioden bei 60Hz [angloamerikanische Netze]) oder ein ganzzahlig Vielfaches üblich. Bei hochpreisigen Geräten kann diese Zeit eingestellt werden, wodurch ein optimales Verhältnis von Messgeschwindigkeit und Genauigkeit erzielt werden kann. Man sehe unter dem Menüpunkt NPLC (Number of Power Line Cycles) nach.

## Die Fehler eines Multimeters

Der Gesamtfehler eines digitalen Messgerätes setzt sich aus mehreren Einzelfehlern zusammen:

Quantisierungsfehler: Bei der Umwandlung einer analogen Größe in eine Zahl mit endlich vielen Bits entsteht aufgrund der begrenzten Auflösung ein systematischer Fehler, der als Quantisierungsfehler bezeichnet wird. Theoretisch beträgt er  $\pm$  ein halbes Bit der niederwertigsten Stufe (LSB, least significant bit). Dieser Fehler kann auch als Rauschen interpretiert werden. Hinweis: Es gibt viele Arbeiten, die mittels statistischer Methoden auch aus dem LSB noch sinnvolle Informationen entnehmen wollen. Ohne diese Arbeiten in Zweifel zu ziehen: Bei DMMs lässt man das bleiben. 1 LSB (gleich 1 Digit) Fehler sind prinzipiell unausweichlich!

Nullpunktfehler: Hiermit ist ausschließlich die Abweichung des Messwertes von Null bei Eingangswert Null gemeint! Dieser ist aufgrund der ausgereiften Nullpunktsautomatik in der überragenden Zahl der Fälle zu vernachlässigen. Einzig nach längeren Strommessungen kann es aufgrund der lokalen Erwärmung zum Auftreten von Thermospannungen kommen. Diese verschwinden nach kurzer Zeit aufgrund der Abkühlung wieder von selbst.

Fehler bei offenem Messeingang: Durch parasitäre Einstreuungen, vor allem aus dem Lichtstromnetz, ist bei Spannungsmessung mit unter Umständen erheblichen Pseudo – Messwerten zu rechnen. Desgleichen können durch Influenz durchaus einige Meter weit übertragene Aufladungen (beispielsweise Wetzen auf dem Sessel, Ausziehen von Bekleidung oder Schleifbewegungen der Schuhe auf dem Boden) erzeugte Spannungswerte je nach Gegebenheit beträchtliche Ausmaße annehmen. Das sind aber keine Fehler des Messgerätes an sich, sondern Fehler beim Design und der Realisierung des Messaufbaus.

Endwertfehler DC: Das ist die Abweichung des Messwertes vom tatsächlichen Wert bei Bereichsendwert. Heutzutage sind diese Fehler in den Gleichspannungs- und

Widerstandsbereichen minimal und bei nicht qualitätsrelevanten (ISO9000 und dergleichen) Messgeräten zu vernachlässigen.

Endwertfehler AC: Hier sammelt sich die Fülle der möglichen Fehler! Gerade bei den Billigstgeräten, die oft lediglich 200V und 250V AC Bereiche haben, treten bei niedrigen Spannungen massive Linearitätsfehler auf, die eine sinnvolle Messung unter etwa 20V unmöglich machen! Natürlich gibt es auch weitere Linearitätsfehler, also die Abweichung von Messwert und tatsächlichem Wert abhängig von der Aussteuerung. Dazu kommen Abweichungen als Funktion der Frequenz und natürlich des Crestfaktors. Bei Frequenzen unter 40Hz kommen möglicherweise Integrationsfehler dazu.

**Bei der Messung von AC – Größen ist große Bewusstheit über die Eigenschaften des verwendeten Gerätes notwendig, um sinnvolle Messergebnisse zu erhalten!**

Die Grenzen von Nullpunkts-, Quantisierungs- und Linearitäts – Abweichungen sind Konstanten über den ganzen Messbereich, die Grenze der Empfindlichkeitsabweichung ist proportional zum Messwert. Zusammengefasst wird diese Fehlergrenze des Messgerätes als Summe zweier Größen angegeben:

z. B. = 0,2 % v. M. + 1 Digit oder 0,2 % v. M. + 0,05 % v. E.

Die Abkürzungen „v. M.“ und „v. E.“ stehen gemäß Sprachregelung in DIN 43751 für „vom Messwert“ und „vom Endwert“.

## Die Arbeit mit dem Multimeter

Zuerst zwei Sprüche aus der Kiste des Großvaters, die ich Euch in Eurem Interesse ersuche zu beachten:

**Übermut tut selten gut.**

**Wer lesen kann, ist besser dran!**

Das heißt konkret, gerade wenn Ihr noch nicht so geübt seid:

- Macht Euch klar, was die anstehende Messaufgabe ist. Spannung, Strom oder Widerstand? AC oder DC? Oder eine andere Art von Messung (Kapazität, Diodenstrecke, Leitfähigkeit,...?)
- Den Aufdruck nahe den Eingangsbuchsen des DMM lesen und identifizieren, welches Buchsenpaar für die gegenständliche Messaufgabe zu verwenden ist.
- Die Bedienungselemente des DMM durchsehen. Ist das ein Gerät mit getrennter Einstellung von Messart und Messbereich oder gibt es dafür einen gemeinsamen Schalter? Wie schaltet man AC / DC um? Wie wird das Gerät ein- und ausgeschaltet? Hat das Gerät automatische oder manuelle Bereichswahl?

Als nächstes plant Ihr den Messaufbau: Ihr habt schon gelernt, dass die Spannungsmessung parallel und die Strommessung in Serie erfolgt.

Speziell bei Strommessungen vor der Inbetriebnahme noch einmal kontrollieren. Sicherstellen, dass Ihr nicht den Ausgangsstrom des Netzgerätes zu messen versucht. Das hieße nämlich, dass

die Sicherung im DMM stirbt. Der wirtschaftliche Schaden ist begrenzt, aber für die Tutoren heißt das, das Gerät aufschrauben, aus dem Lager die richtige Sicherung heraussuchen, ersetzen, wieder zusammenbauen. Alles schlecht für die Laune.

Ihr wisst natürlich längst: Nach Abschluss der Strommessung ist die dafür nötige Unterbrechung des Stromkreises wieder zu ... .

Bei Widerstandsmessungen vor der eigentlichen Messung schnell die Spannung am Widerstand messen. Gerade bei komplizierteren Aufbauten übersieht man schnell, dass irgendwo noch Spannung anliegt und dann kann ich wieder die Reise nach Stockholm zahlen.

Bei allen Messungen heißt es: Finger weg! Auch wenn die im Labor verwendeten Spannungen keine nennenswerten physiologischen Wirkungen haben, so kann der elektrische Widerstand des Körpers die Messergebnisse verfälschen. Immerhin können zwischen den Fingern je nach Handfeuchtigkeit und Bewusstseinszustand ([wer das nicht glaubt schaut unter Psychogalvanometrie nach](#)) Widerstände zwischen ein paar Hundert Ohm und Megaohm auftreten!

Wenn Ihr nicht im Voraus eine gute Vorstellung habt, welcher Messbereich zu wählen ist, dann wählt immer den größten. Zurückschalten kann man immer und das tut ihr dann auch, wenn der Anzeigewert zu klein ist. Immer so weit zurück schalten, bis der Anzeigewert so groß wie möglich ist, ohne auf Überlauf zu gehen. Verschenkt keine Information!

**Und jetzt viel Spaß bei der Praxis der Elektrotechnik!**

# Übungsaufgaben

Du hast eine ideale 10V Spannungsquelle zur Verfügung. Für eine elektronische Schaltung benötigst Du eine  $\pm 5V$  Spannungsquelle mit geringer Belastbarkeit. Wie konstruierst Du diesen Aufbau?

Der Widerstandswert eines elektrischen Widerstandes bei 0 Volt ist zu bestimmen. Wie gehst Du vor?

Eine Katze spielt mit dem Lichtschalter einer batteriebetriebenen Taschenlampe. Entsteht auf diese Weise Wechselspannung?

Ein lineares elektrisches Netzwerk ist durch die Klemmenspannung 10V und den Innenwiderstand  $100k\Omega$  definiert. Verwendest Du das Norton – Äquivalent oder das Thévenin – Äquivalent?

Ein lineares elektrisches Netzwerk ist durch die Klemmenspannung 10V und den Innenwiderstand  $0.1\Omega$  definiert. Verwendest Du das Norton – Äquivalent oder das Thévenin – Äquivalent?

Erkläre die Unterschiede zwischen Masse und Erde.

Nur für Fortgeschrittene: Gib die Kennfarben für den Neutralleiter und den Leiter der Schutz Erde an. Darf man bei Elektroinstallationsanlagen den Neutralleiter mit der Schutz Erde verbinden?

Nenne einige Arten von Dioden und erkläre mit wenigen Worten deren Einsatzzwecke.

Mit einem DMM wird ein Strom von 10A gemessen. Der Messwiderstand ist so bemessen, dass an ihm bei 20A ein Spannungsabfall von 200mV auftritt. Berechne:

- Den Widerstandswert des Messwiderstandes.
- Die unter diesen Bedingungen (im Idealfall) freigesetzte Wärmeleistung.
- Die unter diesen Bedingungen (im Idealfall) innerhalb 1 Minute freigesetzte Wärmeenergie.
- Um wie viele Grad Celsius (ab Raumtemperatur) würde  $1cm^3$  Wasser (im Idealfall) mit dieser Wärmeenergie erwärmt werden?

Erkläre die Funktion einer Diode.

Erkläre die Funktion eines Einweggleichrichters.

Erkläre die Funktion eines Brückengleichrichters.

Du misst den Widerstand einer Siliziumdiode mit der Widerstandsmessfunktion eines DMM. Welche Anzeige erwartest Du?

Du hast ein Drehpulmessinstrument mit den Werten 1mA  $15\Omega$ . Du möchtest damit 250V Gleichspannung messen. Geht das prinzipiell? Was musst Du ergänzen? Hinweis: Beide technisch relevanten Werte sind zu berechnen!

Du hast ein Drehpulmessinstrument mit den Werten 1mA  $15\Omega$ . Du möchtest damit 1A Gleichstrom messen. Geht das prinzipiell? Was musst Du ergänzen? Hinweis: Beide technisch relevanten Werte sind zu berechnen!



Du hast ein Drehspulmessinstrument mit den Werten  $1\text{mA}$   $15\Omega$ . Du möchtest damit  $250\text{V}$  Wechselspannung messen. Geht das prinzipiell? Was musst Du ergänzen oder ändern? Hinweis: Zwei Antworten sind gefordert!

Du misst mit einem Voltmeter die Spannung an einer hochohmigen Quelle. Während der Messung kommt eine Kollegin / ein Kollege und zieht den Pullover aus. Welche Konsequenz für Deine Messung erwartest Du? Was machst Du dagegen?

Du hast nur ein Budget von unter  $1\text{€}$  für einen Aufbau zur Abschätzung der Höhe von Gleichstrom. Was konstruierst Du? (Nein, nicht bei ebay kaufen...)

Du möchtest den genauen Widerstandswert eines Widerstandes mit nominal  $100\text{m}\Omega$  messen. Wie gehst Du vor?

Nenne mindestens vier gebräuchliche Halbleitermaterialien für Dioden. Bonuspunkt: Was war das erste Halbleitermaterial, mit dem bereits 1874 eine Diode hergestellt worden war?

Welchen Anzeigebereich erwartest Du bei einem DMM mit der Angabe „3,5 Stellen“?

Nenne die drei wichtigsten Möglichkeiten, Wechselspannung zu quantifizieren. Gib von allen die mathematische Berechnungsweise an. Welche Berufsgruppen interessieren diese?

Nenne die beiden größten Gefahren bei der Verwendung von Laborsteckverbindern mit offenen Kontaktflächen.

Du hast ein Billigst – DMM mit lediglich einem  $200\text{V}$  AC Messbereich zur Verfügung. Du sollst eine Wechselspannung von ungefähren  $6\text{V}$  damit messen. Wie gehst Du vor? Hinweis: Ihr alle seht nicht aus, als seid Ihr bedürftig.

Du sollst eine auf Erde bezogene Spannung zwischen  $10\text{kV}$  und  $20\text{kV}$  messen. Dafür hast Du ein gutes DMM zur Verfügung. Was benötigst Du noch? Hinweis: Den Namen habe ich im Text genannt, wie so etwas aussieht, musst Du im Internet herausfinden.

Du hast ein billiges Messgerät zur Verfügung, das nur den korrigierten Betragsmittelwert misst. Leider musst Du eine Wechselspannung messen, die wie folgt definiert ist:

1 Zeiteinheit  $+1\text{V}$ ,  
dann 4 Zeiteinheiten  $0\text{V}$ ,  
dann 1 Zeiteinheit  $-1\text{V}$   
und dann wieder 4 Zeiteinheiten  $0\text{V}$ .

Hinweis: Dein Messgerät mittelt ideal.

- Skizziere die Funktion!
- Wie hoch ist der tatsächliche Effektivwert?
- Welchen Anzeigewert erwartest Du?
- Wie viel Fehler macht das BMW – Messgerät im Vergleich zu einem TrueRMS – Messgerät?

