



# KNOW-HOW MESSGRÖSSE ELEKTRIK.

Das Gebiet der elektrischen Kalibrierungen umfasst einen großen Bereich an unterschiedlichen Messgrößen, welche in nahezu allen Bereichen der Industrie Anwendung finden. Auch im alltäglichen Leben sind wir von der richtigen Funktionsweise elektrischer Geräte abhängig.

Zum Beispiel bei der Energiezählung des jährlichen Strombedarfs, der Netzspannung am Hausanschluss oder dem Ladezustand unserer Autobatterie. All diese Größen sorgen für einen reibungslosen Tagesablauf und sollten deshalb präzise geprüft bzw. gemessen werden. Neben der hierfür eingesetzten direkten Messung von Strom und Spannung, spielt die elektrische Messgröße auch bei der Auswertung der meisten Sensorsysteme eine entscheidende Rolle. Dies begründet sich darüber, dass viele physikalischen Größen über eine Änderung von elektrischen Parametern gemessen werden können. So erfolgt im Bereich der Temperatur unter anderem die Bestimmung dieser über eine korrespondierende Widerstandsänderung. Zur Auswertung der Feuchte wiederum kann das Messprinzip über eine äquivalente Kapazitätsänderung herangezogen werden. All diese Beispiele zeigen bereits, dass es vielfältige Anwendungsgebiete im Bereich der Elektrotechnik gibt und der Überbegriff elektrische Kalibrierung eine große Anzahl an Messgrößen und abgeleiteten Messgrößen beinhaltet. Im Rahmen dieser Abhandlung soll ein grober Überblick über die einzelnen Messgrößen und deren theoretischem Zusammenhang gegeben werden. Des Weiteren sollen spezifische Probleme und Unterteilungen im Bereich der elektrischen Messgröße vorgestellt werden.

Im Wesentlichen lassen sich zwei große Teilgebiete unterscheiden, die Elektrostatik und die Elektrodynamik. Zu ersterem zählen zeitlich nicht veränderliche Größen wie die Gleichspannung und der Gleichstrom. Der Bereich der Elektrodynamik beschäftigt sich wiederum mit zeitlich veränderlichen Größen und deren Wechselwirkungen. Ein Hauptgebiet dieses Fachgebietes ist die Hochfrequenztechnik.

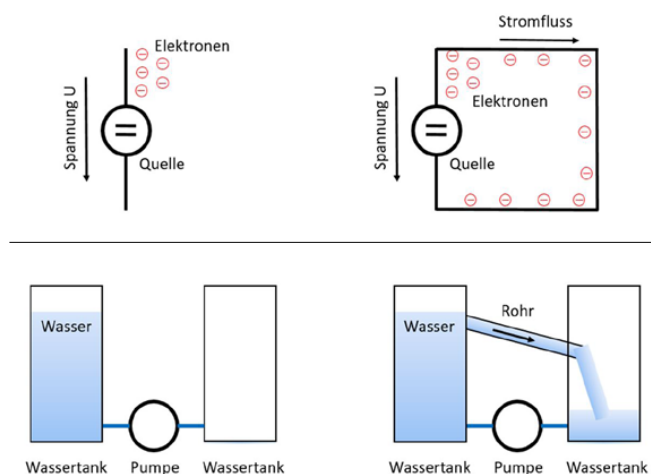
## Theoretische Grundlagen

Als elektrischer Strom wird die Verschiebung von freien Ladungen bezeichnet. Dies können, in einem metallischen Leiter, Elektronen oder, innerhalb einer Batterie, Ionen sein. Wandern diese Ladungen von einem Ende eines Leiters zum anderen, so spricht man in der Praxis von einem Stromfluss. Das Formelzeichen für den Strom ist  $I$  und wird in der Einheit Ampere angegeben. Die Ursache des Stromflusses, quasi die Kraft welche die Ladungsträger von a nach b zieht, ist die elektrische Spannung. Sofern, wie in Abbildung 1 gezeigt, keine Verbindung zwischen zwei geladenen Polstellen besteht und zwischen diesen ein Unterschied an Ladungsträgern herrscht, bildet sich eine Spannung aus.

Das Formelzeichen für die elektrische Spannung ist  $U$ . Die Höhe der Spannung ist abhängig von dem Ladungsunterschied der beiden Polstellen und wird in Volt angegeben. Werden die beiden Polstellen über einen elektrischen Leiter, z. B. ein Stück Metall, verbunden, so kann ein Ausgleich der Ladungsträger stattfinden und es kommt zu einem Stromfluss.

## KNOW-HOW

# Messgrößen im Fokus: Elektrik.



**Abbildung 1:** Oben – Schematische Darstellung der Ladungsverteilung bei einer Quelle im Leerlauf (links) und dem entstehenden Stromfluss bei Verbindung der beiden Polstellen (rechts). Unten – Analogie des Stromflusses am Beispiel einer Wasserleitung zwischen zwei Wassertanks.

Zum besseren Verständnis der beiden Größen Strom und Spannung kann eine Analogie zu einer Wasserleitung aufgestellt werden (Abbildung 1 unten).

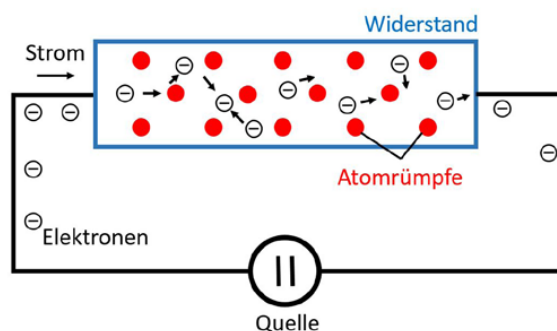
Betrachtet man das in einer Wasserleitung fließende Wasser, so lässt sich der Strom als die Menge des Wassers in einer Leitung und die Spannung in Form der Fließgeschwindigkeit beschreiben. Beide Größen wiederum lassen sich direkt über den Rohrdurchmesser ins Verhältnis setzen. Das heißt, wird der Rohrdurchmesser verkleinert, so erhöht sich bei gleicher Wassermenge die Fließgeschwindigkeit. Wird der Durchmesser hingegen vergrößert, so verringert sich bei gleicher Menge die Fließgeschwindigkeit. Dieser, hier am Beispiel einer Wasserleitung exemplarisch erklärte Zusammenhang, gilt auch in der Elektrotechnik und ist als eines der fundamentalsten und wichtigsten Gesetze bekannt. Hierbei handelt es sich um das ohmsche Gesetz, welches in der Elektrotechnik gemäß den Größen **U** und **I** als,

$$U = R \cdot I$$

definiert ist. Das Formelzeichen **R** beschreibt hierbei den Widerstand, welcher im Falle der zuvor aufgestellten Analogie zu

einer Wasserleitung dem Leitungsdurchmesser entspricht.

In der Elektrotechnik spielen Widerstände eine wichtige Rolle. Sie dienen zum einen dazu den Stromfluss gezielt zu reduzieren. Auf der anderen Seite können sie auch ungewollt in Form einer parasitären Wirkung auftreten, welche verhindert oder herausgerechnet werden muss. In beiden Fällen ist eine präzise Messung der Widerstandswerte erforderlich. Physikalisch begründet sich der Widerstand auf der zuvor erläuterten Ladungsbewegung. Ladungen, die sich im Zuge eines Stromflusses durch einen Leiter bewegen, stoßen während dieser Bewegung mit anderen Ladungsträgern und nicht beweglichen Atomen des Leitermaterials, wie schematisch in Abbildung 2 gezeigt, zusammen.



**Abbildung 2:** Schematische Darstellung des Stromflusses durch einen Widerstand. Kollisionen mit den Atomrümpfen und anderen Elektronen angedeutet durch Pfeile.

Durch die Kollisionen mit anderen Ladungsträgern bzw. festen Atomkernen kommt es zu einer Verlangsamung bzw. teilweisen Sperre des Ladungsflusses. Der Widerstand als physikalische Größe, angegeben in  $\Omega$ , beschreibt wiederum diese Eigenschaft eines Leiters. Je größer dieser Wert ist desto weniger Strom kann durch den Leiter fließen.

Neben dem Widerstand lässt sich auch die elektrische Leistung **P** aus den beiden Grundgrößen Strom und Spannung bestimmen. Diese ergibt sich zu

$$P = U \cdot I$$

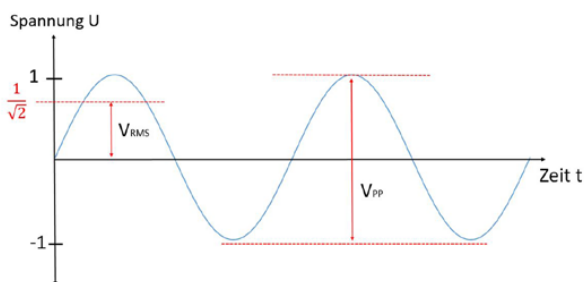
Gemessen wird die elektrische Leistung in **W** (Watt).

## KNOW-HOW

# Messgrößen im Fokus: Elektrik.

Von Wechselstromgrößen spricht man allgemein, wenn keine zeitliche Konstanz der betrachteten Ströme und Spannungen vorliegt. Die Häufigkeit mit der sich die betrachteten Größen pro Sekunde ändern, wird als Frequenz bezeichnet und stellt ein wichtiges Kriterium für die Betrachtungsweise dar. Abbildung 3 zeigt zur Verdeutlichung den zeitlichen Verlauf einer Wechselspannung.

Die gezeigten Wechselgrößen können an Hand der Frequenz und Amplitude charakterisiert werden. Bei der Amplitude können hierbei unterschiedliche Werte angegeben werden. Es lässt sich zum einen ein „Peak-Peak“ Wert bestimmen, welcher dem Abstand zwischen Amplitudenmaximum und Minimum entspricht.



**Abbildung 3:** Zeitlicher Verlauf einer Wechselspannung unter Kennzeichnung der unterschiedlichen Amplitudengrößen  $V_{PP}$  und  $V_{RMS}$

Häufig findet man in der Angabe von Wechselspannungen auch den sogenannten RMS-Wert. Dieser entspricht

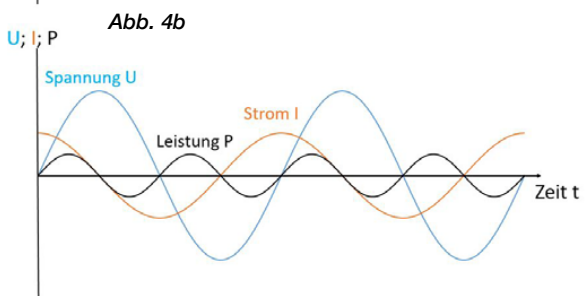
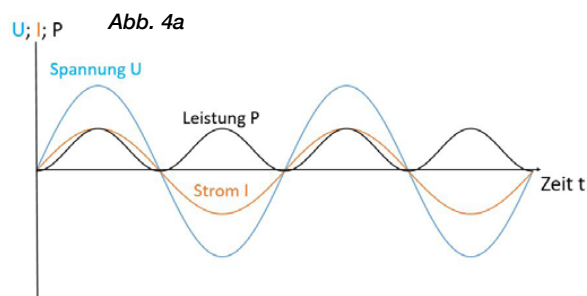
$$V_{RMS} = \frac{1}{2} * \frac{1}{\sqrt{2}} V_{PP}$$

Wird erneut das ohmsche Gesetz unter der Annahme einer Wechselspannung betrachtet, so ergibt sich ein zusätzlicher Einflussparameter, welcher im Vergleich zu den Gleichspannungsgrößen ebenfalls betrachtet werden muss. Die Amplituden der beiden Signalgrößen Strom und Spannung können zeitlich zueinander verschoben sein. Diese, ebenfalls in Abbildung 3 gezeigte, zeitliche Verschiebung wird als Phasenbeziehung zwischen Strom und Spannung bezeichnet. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass es bei Wechselgrößen Widerstände gibt, welche sich lediglich durch die erzeugte Phasenbeziehung unterscheiden. Man spricht deshalb im Bereich der Wechselgrößen

nicht mehr von Widerstand, sondern von Impedanz und gibt dieser komplexen Größe (bestehend aus Betrag und Phase bzw. Real- und Imaginär-Teil) das Formelzeichen  $Z$ .

Verglichen mit den Gleichstromgrößen, bei welchen der komplexe Anteil eines Bauteils keinen Einfluss auf sein Verhalten hat, spielt bei Wechselstrom dieser Einfluss eine entscheidende Rolle und ist verantwortlich für die entstehende Phasenbeziehung zwischen Strom und Spannung. Bauteile wie Kapazitäten und Induktivitäten, welche gemäß der Theorie nur einen komplexen Anteil enthalten, sind hier von besonderer Bedeutung und können über die Bestimmung der komplexen Impedanz ermittelt werden.

Die zuvor erläuterte Phasenbeziehung zwischen Strom und Spannung hat bei Wechselgrößen ebenfalls zur Folge, dass die bei Gleichstrom einfach berechnete elektrische Leistung  $P$  eine Abhängigkeit von der Phasenbeziehung aufweist. Graphisch lässt sich die Wechselstromleistung als die Multiplikation jedes einzelnen Strom- und Spannungswertes im zeitlichen Verlauf darstellen (Abbildung 4).



**Abbildung 4a:** Oben – Strom-Spannungsverlauf und daraus berechneter Leistungsverlauf mit einem positiven Mittelwert (Wirkleistung vorhanden); **Abbildung 4b:** Unten – Strom-Spannungsverlauf und daraus berechneter Leistungsverlauf mit einem Mittelwert von null (reine Blindleistung)

## KNOW-HOW

# Messgrößen im Fokus: Elektrik.

Wie Abbildung 4 zeigt, ergibt sich durch die punktweise Multiplikation von Strom und Spannung erneut ein periodischer Verlauf der Wechselstromleistung. An Hand dieses Verlaufs kann die durchschnittliche Leistung berechnet werden, welche als Wirkleistung bezeichnet wird. Diese muss nicht zwangsläufig mit der im System verfügbaren Leistung, berechnet über die Multiplikation der Strom und Spannungsamplitude (RMS-Wert), übereinstimmen, wie der Fall in Abbildung 4b zeigt.

Aus diesem Grund bezeichnet man die im System verfügbare Leistung auch als Scheinleistung, gemessen in **var**. In Abbildung 4b ergibt sich eine Wirkleistung von 0 W, während die gesamte verfügbare Leistung im System nicht null entspricht. Die Leistung, welche hierbei für die Phasendrehung verantwortlich ist, wird als Blindleistung bezeichnet.

Beide Größen können unter Kenntnis des Phasenwinkels  $\varphi$  berechnet werden über

$$P_{\text{Wirkleistung}} = U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

$$P_{\text{Blindleistung}} = U \cdot I \cdot \sin(\varphi)$$

Die Addition aus Wirk- und Blindleistung ergibt die oben erläuterte Scheinleistung. Alle drei Größen spielen eine wichtige Rolle bei der Kalibration von Leistungsmessgeräten oder -analysatoren.

### Hochfrequente Betrachtungsweise

Die Betrachtung von Strömen und Spannungen im Wechselstrom Fall kann nur bis zu einer bestimmten Frequenz erfolgen. Bei höheren Frequenzen muss eine Wellenbetrachtung vorgenommen werden. Diese Unterscheidung bildet den Übergang der Niederfrequenz in die Hochfrequenz. Die Grenzfrequenz für diesen Übergang kann nicht spezifisch genannt werden, sondern muss je nach Anwendungsfall spezifisch an Hand der betrachteten Strukturgröße (Leitungslängen) in Kombination mit der Signalfrequenz bestimmt werden. Die Grundlage für diesen Übergang begründet sich darin, dass zur Messung von Strom und Spannung ein Kurzschluss bzw. ein Leerlauf nötig ist. Mit zunehmender Frequenz lassen sich diese beiden Messbedingungen allerdings nicht mehr ohne parasitäre Einflüsse erfüllen, weshalb die Betrachtungsweise von Wellen, bezogen auf eine feste Wellenimpedanz, eingeführt wurde. Im Bereich HF fin-

det man sehr häufig Bezugswellenwiderstände von 50  $\Omega$  oder 75  $\Omega$ .

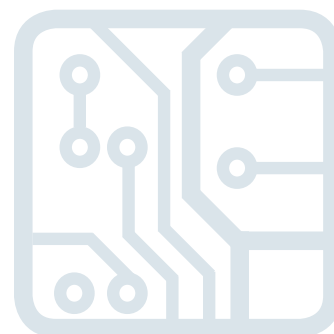
Auf Grundlage der Welleneigenschaften befasst sich die Hochfrequenztechnik, ähnlich wie die Optik, mit Reflexionserscheinungen. Das Verhalten von Bauteilen wird hierbei nicht mehr über diskrete Impedanzen beschrieben, sondern über systemtechnische Betrachtungen in Form von sogenannten Streu-Parametern kurz S-Parameter. Allgemein findet hier eine Analyse der Signale meist im Frequenzbereich statt. Das heißt, dass bei einer Darstellung der Signale nicht, wie in Abbildung 4 aufgeführt, die Zeitachse als X-Achse verwendet wird, sondern hier die jeweiligen Frequenzen auf der X-Achse und deren Amplituden auf der Y-Achse stehen.

### Typische Kalibriergegenstände

Bei der elektrischen Kalibrierung wird zunächst zwischen Geben und Messen, bezogen auf den Kalibriergegenstand, unterschieden. Im Falle von Geben erfolgt die Kalibrierung durch Referenzmessgeräte. Bezüglich der Unsicherheit darf in diesem Fall keine Auflösung des Kalibriergegenstandes berücksichtigt werden, da Quellen per Definition keine Auflösung haben. Die häufig bei Netzteilen angetroffene Einstellungsanzeige, welche mit einer Auflösung behaftet ist, stellt wiederum eine Messeinrichtung dar und wird als zusätzliche Messfunktion der Quelle separat kalibriert.

Für reine Messgeräte erfolgt eine Kalibrierung über Referenzquellen oder durch einen Vergleich mit einem weiteren angeschlossenen Referenzmessgerät. In beiden Fällen muss die Auflösung des Kalibriergegenstandes als zusätzlicher Unsicherheitsbeitrag bei der Kalibrierung berücksichtigt werden.

Kalibrierung  
elektrischer  
Messgeräte  
durch Testo  
Industrial  
Services



## KNOW-HOW

# Messgrößen im Fokus: Elektrik.



### Digitalmultimeter, Stromzangen, Netzteile

Klassische Gegenstände der Niederfrequenztechnik bei welchen vor allem Gleich und Wechselstromgrößen kalibriert werden. Je nach Genauigkeitsklasse werden hierfür unterschiedlich aufwendige Verfahren eingesetzt.



### Hochfrequenzbauteile

Hierunter können unterschiedliche Leitungsabschlüsse, Kabel, Dämpfungsglieder oder auch Filter aufgefasst werden. Die Kalibrierung dieser Gegenstände erfolgt mit Hilfe eines sogenannten Netzwerkanalysators. Dieser dient dazu, die zuvor erläuterte systemtechnische Betrachtung der Bauteile in Form von S-Parameter zu bestimmen.



### Leistungsmessgeräte

Bei Leistungsmessgeräten geht es vornehmlich um die Messung von Wechselgrößen, wie Strom und Spannung, aber auch um deren Phasenbeziehung zueinander und die daraus abgeleiteten Größen Wirk- und Blindleistung.



### Widerstandsnormale

Die Kalibrierung von Referenznormalen erfolgt entweder über die direkte Messung oder das Substitutionsverfahren. Bei der direkten Messung wird ein bekannter Prüfstrom auf die Normale gegeben und der Spannungsabfall über diesen gemessen. Insofern eine sehr hohe Genauigkeit gefordert ist, über die Kalibrierung im Substitutionsverfahren. Dies bedeutet, dass eine bekannte Referenz im Vergleich zu dem zu kalibrierenden unbekanntem Normal gesetzt wird.



## KNOW-HOW

# Messgrößen im Fokus: Elektrik.



### Oszilloskope

Hierbei handelt es sich um Gerätetypen, welche die zeitliche Darstellung von Wechselspannung bis hin zu einer spezifischen Grenzfrequenz erlauben. Zur Kalibrierung dieser Geräte werden zum einen Wechselgrößen untersucht, aber auch, je nach geforderter Grenzfrequenz, Hochfrequenztypische Verfahren angewendet. Die Bestimmung der Grenzfrequenz oder die vorgegebene Wellenimpedanz des Anschlusses sind zwei typische hochfrequente Messgrößen im Bereich der Oszilloskop Kalibrierung.

Autor

**Dr. Matthias Ohlrogge**

Technischer Leiter elektrische Labore



Elektrische  
Messgrößen



Seminar:  
Kalibrierung elektri-  
scher Messmittel



Akkreditierungs-  
urkunde

### WEITERE THEMEN IM NEWSLETTER:

- > [Full-Service: Unser Logistikkonzept](#)
- > [Digitales Firmensiegel](#)
- > [Termine im Herbst/Winter 2018](#)
- > [Seminare 2018/2019](#)

### KONTAKT FÜR WEITERE FRAGEN:

Testo Industrial Services GmbH  
Gewerbstraße 3  
79199 Kirchzarten

Tel. 07661/90901-8000  
E-Mail: [info@testotis.de](mailto:info@testotis.de)