

GLEICHSTROM /
WECHSELSTROM

NP

Die Anwendung der Elektrizität als Energie- und Nachrichtenträger bestimmt weitgehend wichtige "Werkzeuge" des Menschen ab dem 20. Jahrhundert. Insbesondere in den naturwissenschaftlich-technischen Arbeitsgebieten haben elektrische Schaltkreise über die physikalische Natur der Phänomene hinaus elementare Bedeutung für die Mess- und Regeltechnik (Signalstromkreise). Anwendungsbezogene Grundkenntnisse auf diesem Gebiet gehören daher zu den Standardqualifikationen jedes Naturwissenschaftlers.

Schwerpunkt des vorliegenden Versuchs ist die Einführung in wichtige Messgeräte und elementare Schalt- und Messtechniken sowie die Übung im praktischen Umgang und Einsatz der Geräte an einfachen Schaltungsbeispielen.

In Gleichstromkreisen sind Strom und Spannung von der Zeit unabhängig (englische Bezeichnung *dc* von *direct current*). Im Gegensatz dazu stehen Wechselstrom- (englisch *ac* von *alternating current*) und Impuls- kreise, die zeitabhängige Spannungen und Ströme verarbeiten; siehe dazu auch die auf diesen Versuch folgenden Themen R-C-KREISE und FREIE GEDÄMPFTE SCHWINGUNGEN (L-C-Kreise).

Aufgaben

- (Widerstandsmessung und Widerstandskombination): Bestimmung der Widerstandswerte zweier unbekannter Widerstände für Gleichstrom allein und in Reihen- und Parallelschaltung durch Strom-Spannungs-Messungen.

Bestimmung der Widerstandswerte für Wechselstrom durch Strom-Spannungs-Messungen.

Messung der Widerstandswerte im Widerstandsmessbereich eines Multimeters.

Vergleich der Ergebnisse untereinander und Überprüfung der Gesetze über Widerstandskombinationen.
- (Wechselspannung und Oszilloskop): Beobachtung einer Wechselspannung mit dem Oszilloskop und Bestimmung des Scheitelwertes U_0 , des Spitzenwertes V_{SS} und der Frequenz f der Spannung.

Messung des Effektivwerts U_{eff} mit einem Multimeter und Vergleich mit dem Scheitelwert.

- (Potentiometer): Aufnahme der Kennlinie eines Spannungsteilers (Potentiometer) in unbelastetem und belastetem Zustand und Vergleich mit den theoretischen Erwartungen.

Physikalische Grundlagen**Allgemeine Grundlagen**

Voraussetzung zur Versuchsdurchführung sind Kenntnisse der elektrischen Grundgrößen und elementarer Gesetzmäßigkeiten elektrischer Kreise, insbesondere zu:

- Spannung (U), Strom (I), Widerstand (R);
- Kirchhoffsche Regeln ("Maschenregel" für die Spannung, "Knotenregel" für den Strom);
- Gesetze über Widerstandskombinationen.

Diese Grundlagen werden in allen Lehrbüchern ausreichend beschrieben.

Definition des Widerstands

Als *Widerstand* R eines Leiters (Bauteil, Baugruppe) ist das Verhältnis zwischen Spannung und Strom definiert:

$$(1) \text{Def: } R = \frac{U}{I}, \quad \text{Einheit: } 1 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 1 \Omega \text{ (Ohm)} .$$

Die Definition (1) stellt *keine Gesetzmäßigkeit* dar (d.h. keine Funktion $R(U)$ oder $R(I)$), sondern eine Rechenbeziehung für den Widerstand R unabhängig von einem (unter Umständen komplizierten) funktionalen Zusammenhang zwischen Spannung und Strom. Sie ist eine *Größendefinition*, nach der Widerstände für beliebige Spannungs-Strom-Zustände berechnet werden können und die als Rechenregel Bedeutung hat, wobei aus zwei gegebenen Größen durch Umstellung die dritte errechnet werden kann.

Ohmscher Widerstand und Ohmsches Gesetz

Einer der Widerstandsmechanismen kann als "*Strömungswiderstand*" verstanden werden, durch den elektrische Energie in Wärme umgewandelt wird (*joulesche Wärme*). Bei der Bewegung der Ladungsträger durch

einen Leiter kommt es zu Stößen mit den umgebenden Molekülen oder Atomen, wobei deren mittlere kinetische Energie erhöht wird. Dieser Widerstand ist materialabhängig und heißt *ohmscher Widerstand*. Er tritt sowohl bei Gleich- als auch bei Wechselstrom auf.

Für viele Materialien (z.B. die Metalle) ist dieser Widerstand unabhängig von U und I konstant, sofern die übrigen Parameter beibehalten werden (wie z.B. die Temperatur). Spannung und Strom sind dann proportional zueinander. Diese Gesetzmäßigkeit für den Widerstand heißt *Ohmsches Gesetz*.

Temperaturabhängigkeit und Kennlinien

Über die Gültigkeit des *Ohmschen Gesetzes* hinaus kann der Widerstand von anderen Größen abhängen, insbesondere von der Temperatur. Der Widerstand von Metallen nimmt mit steigender Temperatur zu, da sich die Stoßwahrscheinlichkeit mit zunehmender Amplitude der Gitterschwingungen erhöht. Der Widerstand von Halbleitermaterialien nimmt dagegen ab, da bei diesen durch thermische Anregung die Anzahl der freien Ladungsträger mit der Temperatur zunimmt. Der tatsächliche Zusammenhang von Strom und Spannung (auch an elektronischen Bauteilen oder Baugruppen) wird als *Kennlinie* oder *Charakteristik* bezeichnet. Bei Gültigkeit des *Ohmschen Gesetzes* ist die Kennlinie eine Gerade.

Spannungsteiler (Potentiometer)

Nach Gleichung (1) können durch Wahl geeigneter Widerstände Ströme und Spannungen in elektrischen Schaltkreisen festgelegt werden. Eine Standardbaugruppe ist der *Spannungsteiler*. In einer Kette von Widerständen ist der Strom für alle Widerstände gleich, so dass sich an den einzelnen Widerständen die Teilspannungen U zur Gesamtspannung U_0 wie die jeweiligen Teilwiderstände R zum Gesamtwiderstand R_0 verhalten:

$$(2) I = \frac{U}{R} = \text{const} \rightarrow \frac{U}{R} = \frac{U_0}{R_0} \quad \text{oder} \quad \frac{U}{U_0} = \frac{R}{R_0} .$$

In Abb. 1 auf der folgenden Seite ist in Hinsicht auf die tatsächliche Versuchsdurchführung ein kontinuierlich veränderlicher Widerstand als Gesamtwiderstand R_0 skizziert, an dem ein beliebiger Teilwiderstand R "abgegriffen" werden kann (*Potentiometer* aus einer Widerstandsschicht oder einem Widerstandsdraht; *Abgriff* (Pfeil) durch einen Schleifer).

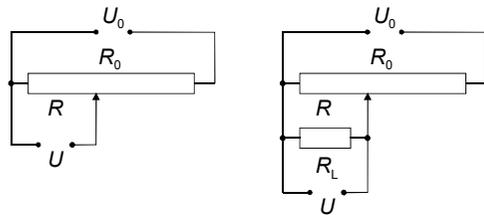


Abb. 1 Potentiometerschaltung ohne (links) und mit (rechts) zusätzlichem Belastungswiderstand R_L

Das einfache Verhältnis (2) gilt nur für den *unbelasteten* Fall, bei dem die Spannung an dem Teilwiderstand nicht durch einen weiteren Verbraucher belastet wird. Beim *belasteten* Spannungsteiler tritt als Teilwiderstand an Stelle von R eine Parallelschaltung aus R und einem zusätzlichen Belastungswiderstand R_L (Abb. 1, rechts). Es folgen als Teil- und als Gesamtwiderstand:

$$(3) R_{\text{Teil}} = \frac{R R_L}{R + R_L} \text{ und } R_{\text{Gesamt}} = \frac{R R_L}{R + R_L} + (R_0 - R)$$

und als Spannungsverhältnis analog zu (2):

$$(4) \frac{U}{U_0} = \frac{R}{R_0 + \frac{R(R_0 - R)}{R_L}}$$

Für $R = 0$ und $R = R_0$ ergeben sich $U/U_0 = 0$ bzw. 1 genau wie im unbelasteten Fall. Zwischen diesen Werten ist U kleiner als im unbelasteten Zustand, da die Parallelschaltung des Belastungswiderstandes den Teilwiderstand verringert. Durch die Belastung "bricht" die Spannung am Spannungsteiler (teilweise) "zusammen".

Wechselspannung und Wechselstrom

Als *Wechselspannung* bezeichnet man eine periodische Spannung mit sinus- bzw. kosinusförmigem Verlauf:

$$(5) U = U_0 \sin \omega t.$$

Die Wechselspannung verursacht an einem Bauteil oder einer Baugruppe einen *Wechselstrom*, der eine

zeitliche Versetzung t' (*Phasenverschiebung* δ) gegenüber der Spannung haben kann (Abb. 2):

$$(6) I = I_0 \sin \omega (t - t') = I_0 \sin(\omega t - \delta).$$

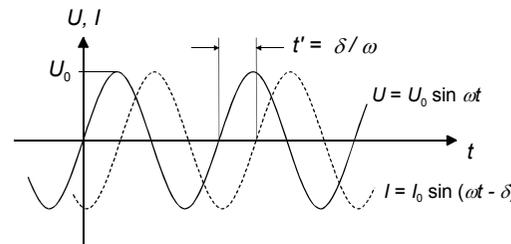


Abb. 2 Grafische Darstellung einer sinusförmigen Wechselspannung und eines in der Phase um t' verschobenen Wechselstroms

Wechselspannungen werden technisch meist durch *Induktion* erzeugt (Dynamogenerator). Wird eine Leiterschleife mit konstanter Winkelgeschwindigkeit in einem homogenen Magnetfeld gedreht, so wird in dieser auf Grund des Induktionsgesetzes eine Wechselspannung induziert.

In Wechselstromkreisen gibt es unterschiedliche Angaben zur Charakterisierung der Größe von Spannung und Strom: die *Amplituden* oder Scheitelwerte (U_0, I_0), die *Effektivwerte* ($U_{\text{eff}}, I_{\text{eff}}$) und die *Spitze-Spitze-Werte* (V_{SS}):

- **Amplitude (Scheitelwert):** Die Amplituden geben die Maxima von Spannung oder Strom an; sie entsprechen dem Amplitudenbegriff der trigonometrischen Funktionen.
- **Effektivwert:** Die Effektivwerte von Spannung und Strom sind charakteristische Werte, deren Produkt (wie im Fall des Gleichstroms) die (mittlere) joulesche Wärmeleistung ergibt:

$$(7) \bar{P} = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}} \frac{I_0}{\sqrt{2}}.$$

Bei zeitlich periodischer Änderung von Spannung und Strom kann die mittlere Leistung \bar{P} berechnet werden, indem die Stromarbeit als Integral über eine Periode T berechnet und anschließend durch die Periodendauer T dividiert wird:

$$(8) \bar{P} = U_0 I_0 \frac{1}{T} \int_0^T \sin^2 \omega t \, dt = \frac{1}{2} U_0 I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{2}} \frac{I_0}{\sqrt{2}}.$$

(Das Integral $\int \sin^2 x$ hat als Lösung $x/2 - (\sin 2x)/4 + C$.)

- **Spitze-Spitze-Wert:** In besonderen Fällen wird für Spannungen die Differenz zwischen größtem und kleinstem Wert als sogenannter Spitze-Spitze-Wert V_{SS} angegeben.

Die Amplituden und V_{SS} können auf dem Oszilloskop direkt beobachtet werden. Die Effektivwerte werden mit Multimetern gemessen, die für Wechselspannungen und -ströme einen eingebauten Gleichrichter enthalten und für diese Messbereiche in Effektivwerten kalibriert sind.

Wechselstromwiderstand

Analog zum *ohmschen Widerstand* R wird als *Wechselstromwiderstand* Z (Scheinwiderstand oder *Impedanz*) das Verhältnis der Amplituden von Spannung und Strom definiert:

$$(9) Z = \frac{U_0}{I_0} \left(= \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} \right).$$

Bei *ohmschen Widerständen* stimmen Gleich- und Wechselstromwiderstand überein. Bei anderen Bauteilen, wie Kondensatoren und Spulen, ist dies nicht der Fall (siehe auch die *Versuche R-C-KREISE* und *FREIE GEDÄMPFTE SCHWINGUNGEN*).

Analogmultimeter

Klassische Geräte zur Messung von Strömen sind Drehspulmessinstrumente, bei denen die Kraftwirkung magnetischer Felder auf Ströme (*Lorentzkraft*; siehe Versuch *SPEZIFISCHE LADUNG DES ELEKTRONS*) ausge-

nutzt wird. Eine stromdurchflossene Spule erfährt in einem homogenen Magnetfeld ein Drehmoment, das dem durch die Spule fließenden Strom proportional ist. Das Drehmoment wird durch eine Feder mit einem linearen Drehmomentgesetz kompensiert. Ein an der Spule befestigter Zeiger liefert somit einen dem Strom proportionalen Ausschlag.

Der Messbereich eines solchen Messwerks kann durch einen *Nebenwiderstand* (*Shunt*) erweitert werden. Schaltet man parallel zum Messwerk einen geeigneten Widerstand, so dass $9/10$ des zu messenden Stroms über diesen Widerstand fließt und nur noch $1/10$ durch das Messwerk, so erhält man eine Messbereichserweiterung um den Faktor 10.

Ein Strommessgerät kann zur Spannungsmessung benutzt werden, indem man es mit einem bekannten *Vorwiderstand* in Reihe an die zu messende Spannung legt, die sich dann nach (1) als Produkt aus dem gesamten Widerstand und dem gemessenen Strom ergibt. Spannungsmessgeräte enthalten diese Vorwiderstände integriert, und die Skala der Geräte ist direkt in der Spannungseinheit V (Volt) kalibriert.

In der Praxis sind Messgeräte verbreitet, bei denen ein Messwerk mit verschiedenen Neben- und Vorwiderständen zu einem Vielfachmessinstrument für weite Strom- und Spannungsbereiche kombiniert ist (*Multimeter*).

Der Fehler von Drehspulmessinstrumenten wird durch die *Güteklasse* angegeben, die den absoluten Fehler in Bezug auf den Messbereich angibt. (Beispiel: Güteklasse 2; Strommessbereich 300 mA; Stromfehler $\Delta I = 2\%$ von 300 mA = 6 mA unabhängig vom Messwert). Die Güteklasse wird im allgemeinen als kleine Zahl ohne weitere Zusätze mit verschiedenen anderen Schaltzeichen auf der Skala des Geräts angegeben (z.B. 1; 1,5; 2 oder 3; nicht aber die Zahl in einem Stern, die eine Angabe über die Gehäuse-Prüfspannung darstellt).

Digitalmultimeter

In der Messtechnik setzen sich zunehmend digitale Messgeräte durch, die einen sogenannten *Analog-Digital-Wandler* (A/D-Converter, ADC) zur Umsetzung von Spannungswerten in ein digitales Signal besitzen. Es gibt verschiedene Verfahren für die A/D-Wandlung. Die zu messende Spannung kann z.B. in Form einer Intervallschachtelung mit einem durch sukzessive Hal-

bierungen verfeinerten Bezugsspannungsintervall verglichen werden, wobei durch die einzelnen Vergleichsergebnisse (JA, NEIN; 1, 0) ein binäres Zahlwort als Messergebnis aufgebaut wird. Oder mit der Messspannung wird ein Kondensator aufgeladen und anschließend bei konstantem Strom entladen, so dass die Entladezeit der Spannung proportional ist. Diese Zeit wird dann digital gemessen.

Der Fehler von digitalen Messgeräten setzt sich aus einem relativen Anteil (% vom Messwert; abgekürzt % v.M.) und einem konstanten Anteil zusammen (Anzahl von Digits (d) = Einheiten in der letzten Stelle der Anzeige)); Beispiel: 0,5 % v.M. + 1 d.

Schaltung von Messgeräten

Zur Strommessung muss das Messgerät immer *in Reihe* zum Strom, zur Spannungsmessung immer *parallel* zu der zu messenden Spannung geschaltet werden. Vor Beginn jeder Messung müssen zum Schutz der Messgeräte die Messbereiche der verwendeten Instrumente auf den *unempfindlichsten* Wert eingestellt werden. In den Schaltungen ist auf die richtige Polarität der Eingänge zu achten.

Oszilloskop (Elektronenstrahloszilloskop)

Das Oszilloskop ist ein wichtiges Instrument zur Beobachtung und Messung von zeitabhängigen, schnellen, *wiederkehrenden* elektrischen Signalen. Der vorliegende Versuch hat als ergänzendes Ziel die Einführung in dieses Gerät. Kernstück eines Oszilloskops ist eine Elektronenstrahlröhre mit einem Elektronenstrahl als praktisch trägheitslosem "Zeiger". Zur Auslenkung des Elektronenstrahls wird die zu untersuchende Spannung an die Platten eines Ablenkcondensators innerhalb der Röhre gelegt, wobei die Elektronen durch die Kraft $F = Q E$ im elektrischen Feld des Kondensators abgelenkt werden.

Oszilloskope besitzen zwei Ablenkensysteme für die X- und für die Y-Richtung (Abb. 3). Zur Untersuchung von Spannung-Zeit-Verläufen wird das Signal über einen Eingangsverstärker an das Y-Ablenkensystem gegeben. Zur Erzeugung einer Zeitachse besitzt das Oszilloskop eine Zeitbasis, die periodisch eine mit konstanter Geschwindigkeit anwachsende Spannung erzeugt (Sägezahnspannung). Diese Spannung wird an das X-Ablenkensystem gelegt, wodurch der Strahl mit konstanter

Geschwindigkeit über den Bildschirm läuft. Geschieht dies hinreichend schnell, so entsteht durch die Trägheit der Leuchtschicht des Bildschirms und des Auges eine durchgehende Linie. Ein *Trigger*-Netzwerk sorgt dafür, dass die Zeitbasis immer in dem Moment "angestoßen" wird, in dem das Signal am Y-Eingang erscheint und synchronisiert damit Signal und Zeitbasis. Für ein wiederkehrendes Signal erhält man auf diese Weise ein stehendes Bild auf dem Bildschirm des Oszilloskops.

Elementare Funktions- und Bedienelemente von Oszilloskopen

Die Wirkung oder Funktion der Schalter und Regler kann aus den Beschriftungen am Gerät erschlossen werden, wenn man sich mit der grundsätzlichen Funktionsweise eines Oszilloskops vertraut gemacht hat.

Bildschirm

- *INTENS.* und *FOCUS*: Regler zur Einstellung von Helligkeit und Schärfe des Bildpunktes (Achtung: eine zu große Helligkeit reduziert die Schärfe des Bildes).
- *cm-Netz* (*DIV.*) über dem Bildschirm zur quantitativen Ablesung der Messwerte.

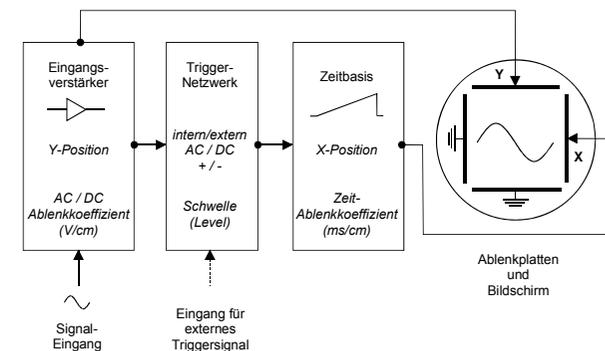


Abb. 3 Funktionsdiagramm eines Oszilloskops

Eingang (Eingangsverstärker)

- *Y-POS.*: Drehknopf zur Einstellung der horizontalen Lage des Bildes (oben/unten).

- **VOLTS/DIV.:** Drehschalter zur Einstellung der Eingangsempfindlichkeit (X-, Y-Ablenkkoeffizienten).
- **VAR.:** Drehknopf zur kontinuierlichen Einstellung der Eingangsempfindlichkeit. *Achtung:* Die Kalibrierung VOLT./DIV gilt nur dann, wenn VAR. am rechten Anschlag steht (Rastposition).
- **DC-AC-GD:** Kopplungsschalter; DC (direct current)= direkte, gleichstrommäßige Kopplung; AC (alternating current) = kapazitive, "galvanisch" getrennte Kopplung, bei der Gleichspannungsanteile unterdrückt werden; GD zur Einstellung des Nullpunktes (Nulllinie).
- **VERT. MODE:** Schalter zur Wahl der Eingangsbetriebsart (Grundeinstellung: Alle Taster gelöst.)

Zeitbasis

- **X-POS.:** Drehknopf zur Einstellung der vertikalen Lage (rechts/links).
- **TIME/DIV.:** Drehschalter zur Einstellung des Maßstabes der Zeitachse (Zeit-Ablenkkoeffizient).
- **VAR.:** Drehknopf zur kontinuierlichen Einstellung der Zeitablenkung. *Achtung:* Die Kalibrierung TIME./DIV gilt nur dann, wenn VAR. am rechten Anschlag steht (Rastposition).

Trigger-Netzwerk

- **TRIG.:** Schalter zur Einstellung der Triggerart (DC / AC / HF = High- / LF = Low-Frequency / ~ = Netzsynchrisation / ± = Steigung der Triggerflanke).
- **EXT.:** Externe Triggerung durch ein zusätzliches Synchronisations-Signal an der TRIG.INP.-Buchse.
- **AT/NORM. – LEVEL:** Schalter für automatische bzw. manuelle Triggerung. Drehknopf für Ansprechschwelle bei manueller Triggerung.

Versuchsdurchführung

Zu Aufgabe 1 und 2 (Widerstandsmessungen bei Gleich- und Wechselstrom)

Als Spannungsquellen sind ein Gleichspannungsnetzgerät und ein Funktionsgenerator (Wechselspannung) vorhanden.

Zur Spannungs- und Strommessung stehen zwei Digitalmultimeter zur Verfügung. Die Multimeter besitzen eine 3½-stellige Anzeige; ihr größter Anzeigewert beträgt 1999. Die Messfehler der Multimeter für die verschiedenen Messbereiche sind im Platzskript angegeben. Man wähle für die Durchführung der Messung geeignete Spannungs- und Stromwerte, bei denen die Messgenauigkeit der Geräte bestmöglich ausgenutzt wird.

Gewöhnliche U/I/R-Multimeter sind für die Messung von Wechselspannungen und -strömen i.a. auf technische Frequenzen von etwa 20 - 200 Hz beschränkt.

Zu Aufgabe 3 (Potentiometer)

Es ist ein 10-Gang-Wendelpotentiometer vorhanden, an dem die Teilspannungen U in Abhängigkeit des Einstellwertes s am Drehknopf des Potentiometers ohne und mit Belastungswiderstand gemessen werden. Der Endwert der Skaleneinstellung ist $s_0 = 10$ Umdrehungen. Der Gesamtwiderstand R_0 der Potentiometer ist jeweils auf den Schaltbrettchen angegeben. Als Belastungswiderstand ist ein 250-Ω-Widerstand auf einem Schaltbrettchen vorhanden; zur späteren Auswertung muss der genaue Wert des Belastungswiderstands mit einem Multimeter gemessen werden. Die Schaltung entspricht der Abbildung 1.

Zur Auswertung werden in einer gemeinsamen grafischen Darstellung die experimentell beobachteten Kennlinien als *Messpunkte* und die theoretisch erwarteten Verläufe als *durchgezogene Kurven* gegenübergestellt. Zur Verallgemeinerung wird das Widerstandsverhältnis R/R_0 als Ordinatengröße gewählt, das durch das Einstellverhältnis s/s_0 ersetzt werden kann.

Der theoretische Verlauf im unbelasteten Fall ergibt sich direkt aus (2). Für den belasteten Fall erhält man durch Umformung von (4):

(10)

$$\frac{U}{U_0} = \frac{\frac{R}{R_0}}{1 + \frac{R}{R_0} \left(1 - \frac{R}{R_0}\right) \frac{R_0}{R_L}} = \frac{\frac{s}{s_0}}{1 + \frac{s}{s_0} \left(1 - \frac{s}{s_0}\right) \frac{R_0}{R_L}}$$

wobei sich insgesamt die in Abbildung 4 dargestellten Verläufe ergeben sollten. Das Ergebnis ist zu diskutieren (Vergleich Experiment/Theorie).

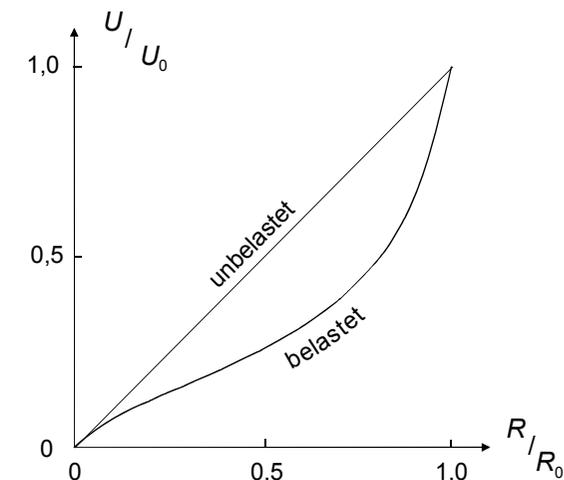


Abb. 4 Potentiometerspannung ohne und mit Belastung