

3.7 Messen von Wechselgrößen

3.7.1 Nichtlineare Umformung mit Halbleiterdioden

Halbleiterdioden werden in Meßschaltungen sehr häufig zur Gleichrichtung von Strömen oder Spannungen verwendet, indem sie in Durchlaßrichtung einen sehr niederohmigen Widerstand und in Sperrichtung einen sehr hochohmigen Widerstand bilden. Daneben wird der steile Stromanstieg von Si-Zenerdioden ab einer bestimmten Höhe der Sperrspannung (der sog. Zenerspannung) dazu eingesetzt, um entweder Spannungen ab dieser Höhe konstant zu halten (Stabilisierung bzw. Überlastungsschutz) oder um Spannungen dieser Höhe zu unterdrücken (Spannungslupe). In Bild 7.9 sind Strom-Spannungs-Kennlinien von Ge- und Si-Dioden im Durchlaßbereich und die Kennlinie einer Si-Zenerdiode im Sperrbereich dargestellt.

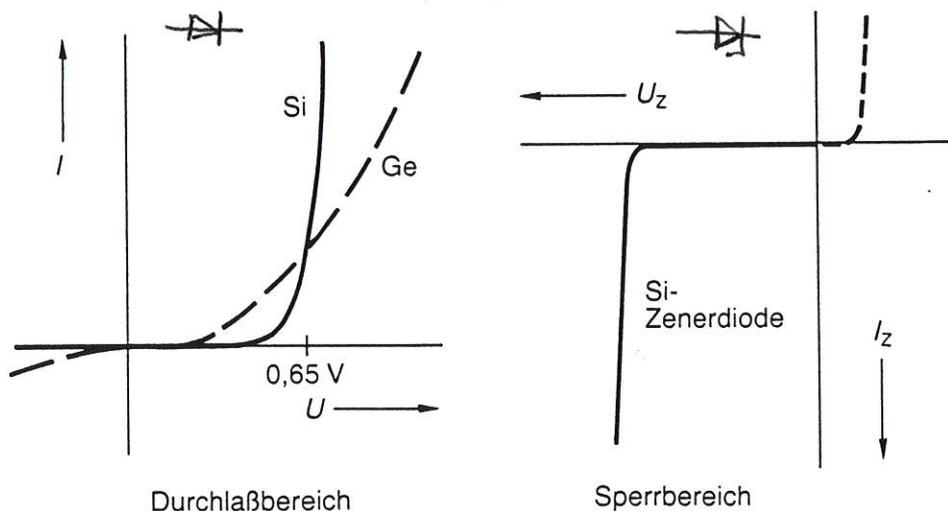


Bild 7.9. Spannungs-Strom-Kennlinien von Halbleiterdioden.

Bei der Anwendung als *Meßgleichrichter* haben **Ge-Dioden** den Vorteil, daß sie bei kleinen Strömen im Durchlaßbereich **geringere Durchlaßspannungen** aufweisen, während **Si-Dioden** geringere Sperrströme und **höhere zulässige Betriebstemperaturen** (bis 150 °C) besitzen.

Während eine Stromgleichrichtung bei genügend hoher Spannung im Meßkreis leicht möglich ist, stört bei Spannungsgleichrichtung der Spannungsbedarf der Gleichrichterdioden in Durchlaßrichtung, wenn die gleichzurichtende Spannung nur wenige Volt beträgt. Die Spannung $I \cdot R_0$ in

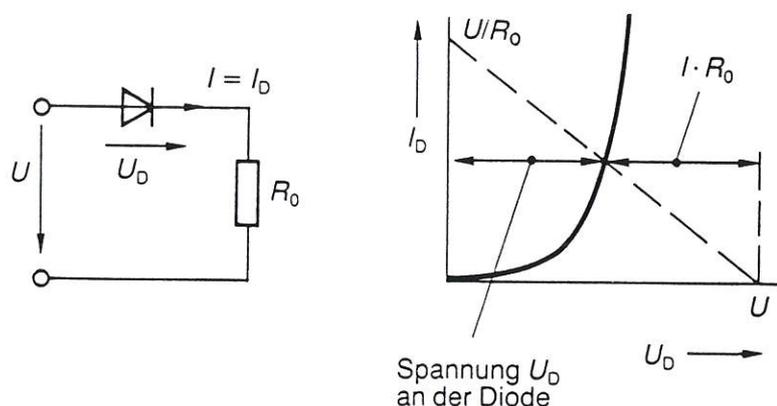


Bild 7.10. Fehler bei Spannungsgleichrichtung durch Spannungsbedarf der Diode.

der Meßschaltung und im Diagramm nach Bild 7.10 ist im Durchlaßbereich um den Spannungsbedarf U_D der Diode gegenüber der Eingangsspannung U reduziert.

Zwei typische Anwendungen von Zenerdioden in Meßschaltungen sind in Bild 7.11 angegeben.

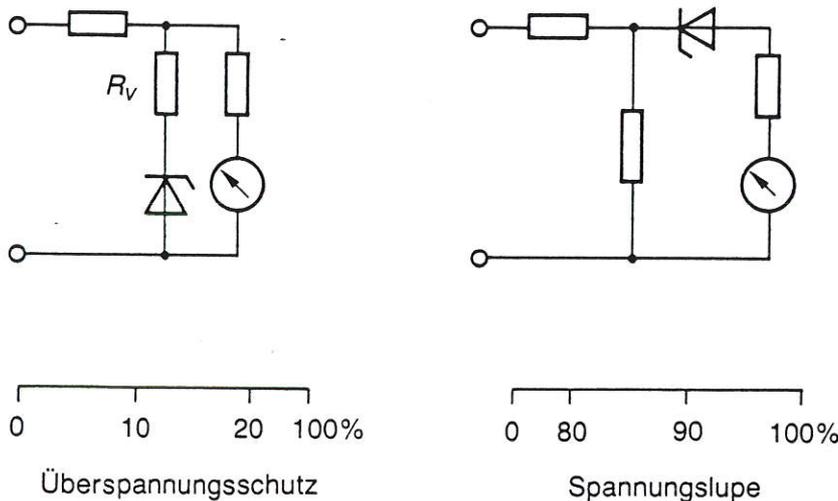


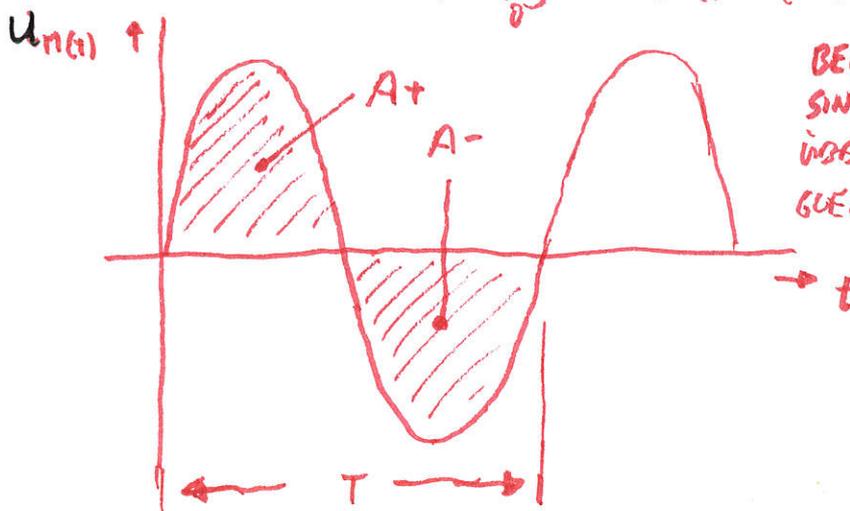
Bild 7.11. Überspannungsschutz und Spannungslupe mit Zenerdioden.

Beim Überspannungsschutz hat die Zenerdiode bis zum Erreichen der Zenerspannung keinen Einfluß auf die Anzeige. Nach Erreichen der Zenerspannung übernimmt die Zenerdiode bei steigender Eingangsspannung den überschüssigen Strom (für $R_v = 0$ fast vollständig), so daß der Strom durch das Meßwerk praktisch nicht mehr ansteigt.

Bei der Spannungslupe kann erst nach Erreichen der Zenerspannung ein Strom durch das Meßwerk fließen, der bei weiter steigender Eingangsspannung dann linear zunimmt.

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{u} \sin \omega t dt = 0$$

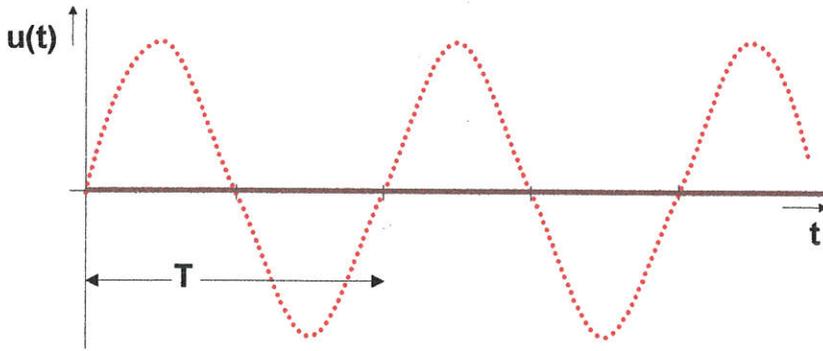
$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{u} \cdot \sin \omega t dt = (A+) + (A-) = 0$$



BEI EINEM NORMALEN
SINUS IST DIE FLÄCHE ($A+$)
ÜBER DER NULLLINIE
GLEICH DER FLÄCHE ($A-$)
UNTERSHALB DER
NULLLINIE.

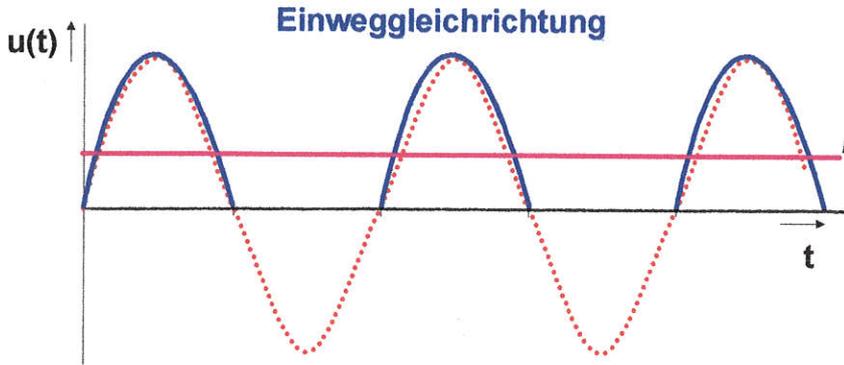


Wechselspannungsgröße $u(t) = \hat{u} \sin \omega t$



Linearer Mittelwert

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{u} \sin \omega t \, dt = 0$$

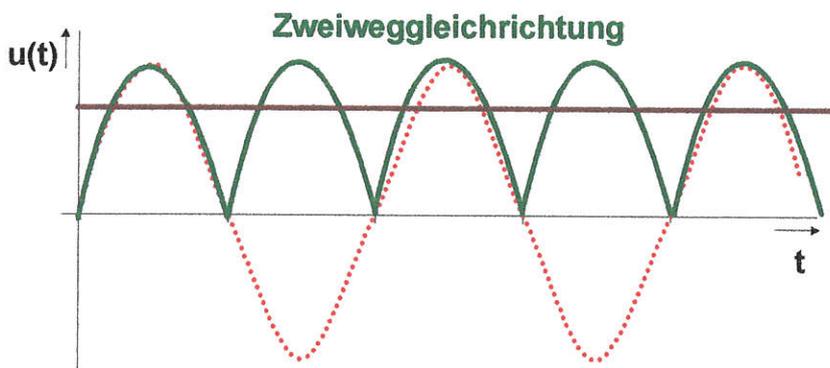


Einweggleichrichtung

Gleichrichtwert der Einweggleichrichtung

$$|\bar{u}| = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{u} \sin \omega t \, dt$$

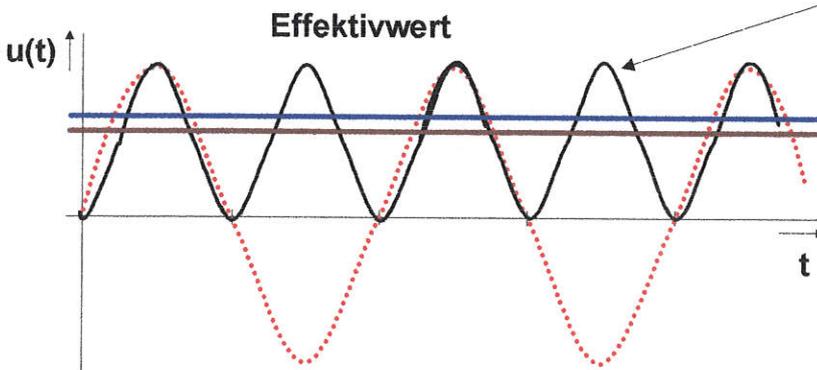
$$u_{de} = 0,319 \hat{u}$$



Zweiweggleichrichtung

Gleichrichtwert der Zweiweggleichrichtung

$$u_{dz} = 0,637 \hat{u}$$



Effektivwert

Effektivwert (quadratischer Mittelwert)

$$u_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (\hat{u} \sin \omega t)^2 \, dt}$$

Effektivwert einer Sinusspannung:

$$u_{eff} = 0,707 \hat{u}$$

Zweiweggleichrichtwert einer Sinusspannung

$$u_{dz} = 0,637 \hat{u}$$

Definition des Effektivwertes:

Eine Wechselspannung mit einem Effektivwert von 230V, lässt eine Glühlampe genauso hell leuchten, wie eine Gleichspannung von 230V.

Bei gleichem Effektivwert ist die thermische Wirkung in einem ohmschen Verbraucher unabhängig von der Kurvenform identisch.

3.7.2 Messung von Wechselstrom und Wechselspannung

Begriffe. Eine sinusförmige Wechselspannung $u(t)$

$$u(t) = \hat{u} \sin \omega t$$

ist durch ihren Scheitelwert \hat{u} und ihre Kreisfrequenz ω bzw. ihre Periodendauer $T = 2\pi/\omega$ festgelegt (Bild 2.20). Die elektromechanischen Meßgeräte können schon bei niedrigen Frequenzen den Augenblickswerten nicht mehr folgen und zeigen so nur gemittelte Werte an. Die Information über die Frequenz geht verloren. Gemessen werden können bei Wechselspannungen und Wechselströmen entweder Scheitelwerte oder Mittelwerte:

Der lineare Mittelwert \bar{u}

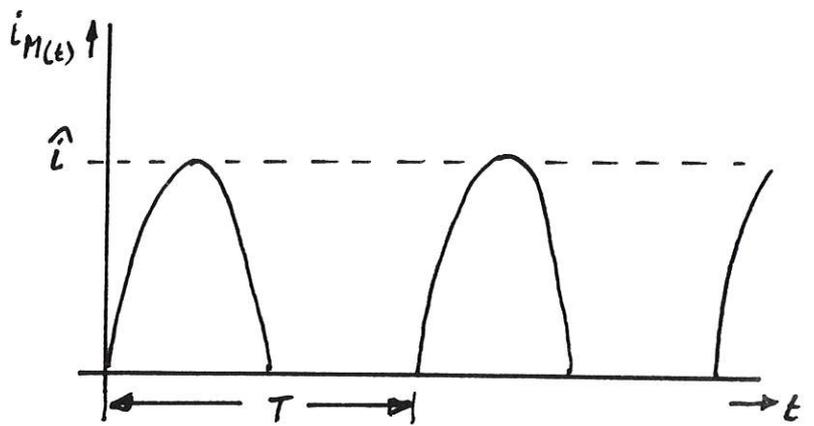
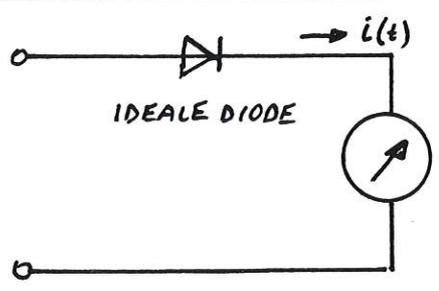
$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{u} \sin \omega t dt = 0$$

$\Omega : \alpha \sim I_M$
FÜR EIN DREHSPYLNSTRUMENT
GILT BEI EINER SINUSFUNKTION

$$\bar{i} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = 0$$

ist für periodische Signale null und hilft so nicht weiter. Besser ist, erst den Betrag zu bilden, d.h. die Meßgröße gleichzurichten, und dann zu mitteln.

EINWEGGLEICHRICHTUNG



ALLGEMEIN GILT:

$$I_d = \frac{1}{T} \int_0^T |i(t)| \cdot dt$$

GLEICHRICHTWERT

Für die Einweggleichrichtung folgt:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{2 \cdot \pi}{T}$$

$$I_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \hat{i} \sin \omega t dt$$

$$I_{dc} = \frac{\hat{i}}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \sin \frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot t dt = \frac{\hat{i}}{T} \left(-\frac{T}{2\pi} \right) \cos \frac{2\pi}{T} \cdot t \Big|_0^{\frac{T}{2}}$$

$$I_{dc} = -\frac{\hat{i}}{T} \cdot \frac{T}{2\pi} [-1 - 1]$$

$$= \frac{\hat{i}}{\pi} = I_{dc}$$

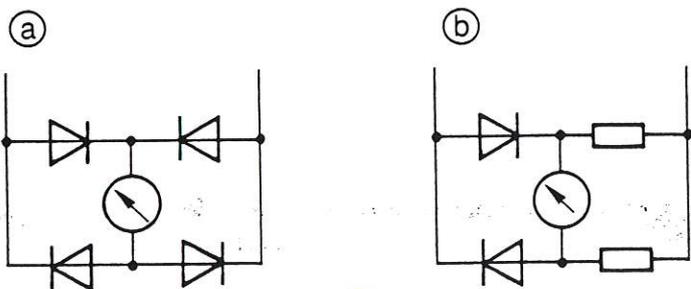
GLEICH RICHTWERT
DER EINWEG-
GLEICHRICHTUNG

Nachteil: Die Information die in der zweiten Halbwelle steckt ob symmetrisch oder nicht wird verschluckt, deshalb verwendet man nur noch.

$$0,318 \cdot \hat{i} = I_{dc}$$

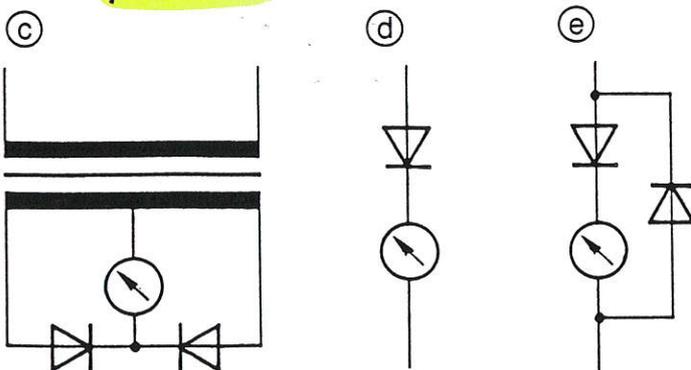
ZWEIWEGGLEICHRICHTUNG

Unter der Annahme idealer Halbleiterdioden (Durchlaßwiderstand gleich Null, Sperrwiderstand unendlich), wird mit den Zweiweg-Gleichrichterschaltungen und einem mittelwertanzeigenden Meßwerk der Gleichrichtwert ge-



GRAETZGLEICH-
RICHTER

DURCH DIE WIDERSTÄNDE
IST DER EINFLUSS DER
DIODEN (U_D) ETWAS GE-
RINGER (DIODEN KENNLINIE,
KRÜMMUNG)



MITTELWERTGLEICHRICHTUNG

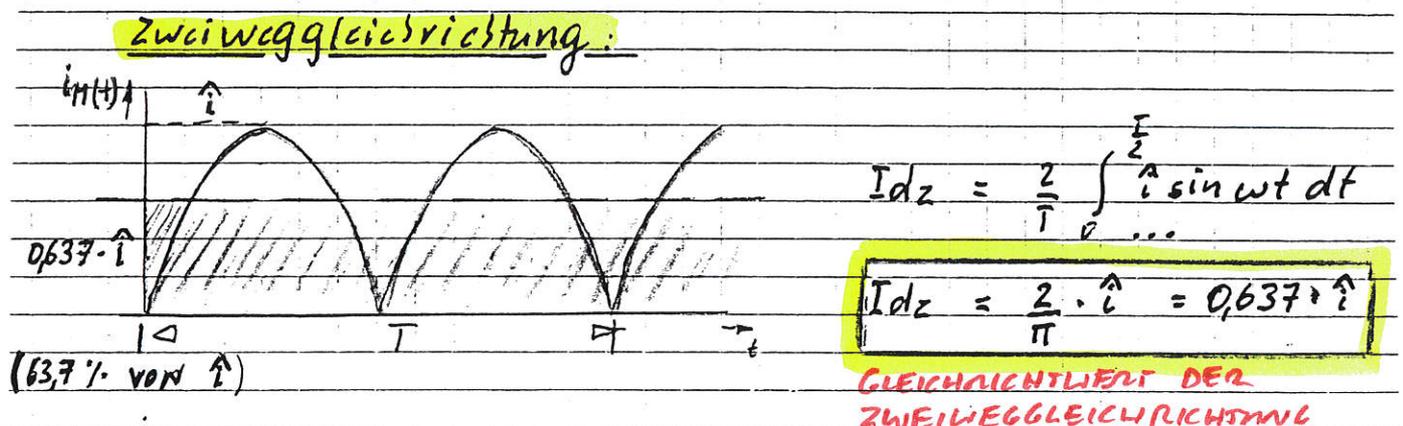
SPANNUNGSGLEICHRICHTUNG

STROMGLEICHRICHTUNG

Bild 9.4. Gleichrichterschaltungen.
a)–c) Zweiweg-Gleichrichterschaltungen,
d)–e) Einweg-Gleichrichterschaltungen.

bildet. Bei den Einweg-Gleichrichterschaltungen erhält man den *halben* Gleichrichtwert, wenn es sich um reine Wechselgrößen handelt.

Der Brückengleichrichter in a) wird auch als Graetz-Gleichrichter bezeichnet. In Schaltung b) sind zwei Dioden durch Widerstände ersetzt. Die reale, gekrümmte Diodenkennlinie kann sich hier nur einmal auswirken, und ein Teil des Meßstromes fließt nicht durch das Meßwerk. Bei der Mittelpunktschaltung c) ist eine Mittelanzapfung der Sekundärwicklung des Wandlers notwendig. Der Einweg-Gleichrichter in d) ist nur für Spannungs-Gleichrichtung und in e) nur für Strom-Gleichrichtung geeignet; in dieser Schaltung muß auch bei umgekehrter Polarität Stromfluß möglich sein.



Der so entstandene Gleichrichtwert $|\bar{u}|$

$$|\bar{u}| = \frac{1}{T} \int_0^T |\hat{u} \sin \omega t| \, dt = \frac{2}{\pi} \hat{u} = 0,637 \hat{u}$$

kann dann als Maß für den Scheitelwert genommen werden.

Vielfachinstrument. Bei Verwendung von Gleichrichtern können mit dem umschaltbaren Drehspulinstrument auch Gleichrichtwerte gemessen werden.

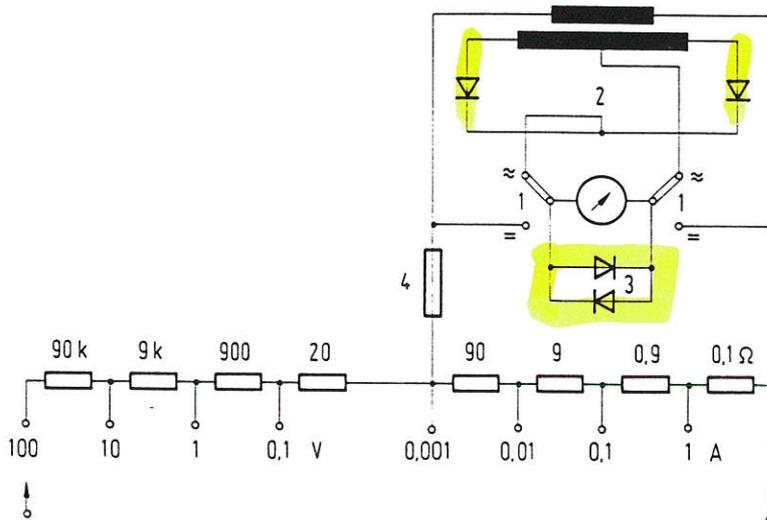


Bild 2.25: Erweiterung des umschaltbaren Drehspulmeßwerks von Bild 2.14 zur Messung von Wechselspannungen und Wechselströmen, Prinzip und Ansicht (Hartmann & Braun)
1 Umschaltung Gleichspannung/Wechselspannung; 2 Doppelweggleichrichtung mit Mittelpunktschaltung; 3 Dioden als Überlastschutz; 4 Sicherung

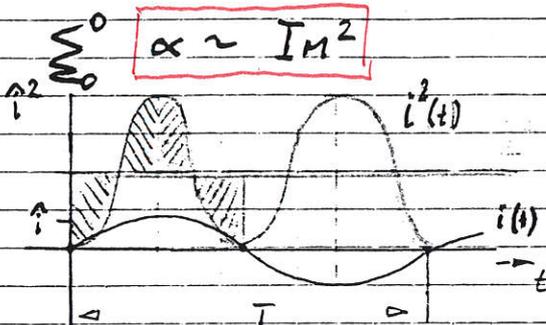


Messung des Effektivwerts

Dreheiseninstrument. Das Dreheiseninstrument ist zur Effektivwertmessung sehr geeignet. Dieses robuste Gerät führt ohne zusätzliche Einrichtungen die für die Effektivwertbildung notwendigen Operationen Quadrierung und Mittelwertbildung durch und kann bis zu Frequenzen von etwa 1 kHz verwendet werden.

Das Dreheiseninstrument bewertet den Effektivwert des durchgehenden Stromes. Sind Spannungen zu messen, so wird die Anzeige indirekt aus dem mit der Impedanz des Meßwerks multiplizierten gemessenen Strom ermittelt. In diesem Fall muß auf die Impedanz Z_s der Feldspule geachtet werden.

EFFEKTIVWERT: IST DIE SPANNUNG DIE EINE GLEICHSPANNUNG HABEN MUSS, UM DIE GLEICHE LEISTUNG AN EINEM VERBRAUCHER ZU VERBRAUCHEN!
z.B.

Drehstrommeßwerk:

Das Meßwerk zeigt den quadr. Mittelwert (Effektivwert) an. !

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$$

gilt allgemein

Die Fläche unter der Sinuskurve, kann man in ein flächengleiches Rechteck umwandeln.

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \frac{I_m^2}{2} \cdot T}$$

$$\Rightarrow I_{\text{eff}} = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}}$$

Aus dem Vergleich zwischen:

$$I_{\text{dz}} = 0,637 \cdot \hat{i} \quad \text{und} \quad I_{\text{eff}} = 0,707 \cdot \hat{i}$$

$$I_{\text{eff}} = 0,707 \cdot \hat{i}$$

folgt; das man die Anzeige des Drehstrommeßwerkes, da wir den Effektivwert messen wollen beeinflussen müssen.Effektivwert: ist die Spannung z. die eine Gleichspannung haben muß, um die gleiche Leistung an einem Verbraucher zu verrichten!

Drehspulinstrument mit Thermoumformer. Um auch mit Drehspulinstrumenten Effektivwerte messen zu können, sind diesen Thermoumformer vorzuschalten (Bild 2.27). Ein Thermoumformer besteht zunächst aus einem Widerstandsdraht, der von dem zu messenden Strom aufgeheizt wird. Die Temperatur des Drahtes ist proportional der umgesetzten Leistung RI^2 , also auch proportional dem Effektivwert I . Sie wird mit einem Thermoelement erfaßt, dessen Gleichspannung dann mit dem Drehspulinstrument gemessen wird.

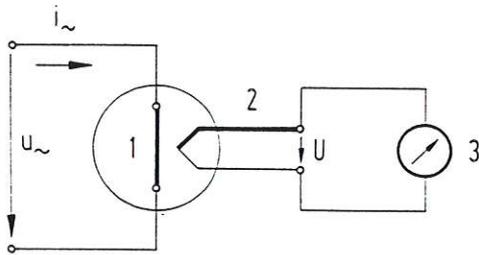


Bild 2.27: Drehspulinstrument mit Thermoumformer zur Messung von Wechselströmen

- 1 Widerstandsdraht
- 2 Thermoelement
- 3 Drehspulinstrument

Der Eigenverbrauch derartiger Geräte liegt zwischen 10^{-3} und 1 VA. Strommessungen sind bis zu Frequenzen von 10^8 Hz, Spannungsmessungen bis etwa 10^5 Hz möglich.

Gleichstrom-Wechselstrom-Komparator. Die Einheiten der elektrischen Größen sind als Gleichgrößen definiert. So entsteht die Aufgabe, die Wechselstrommessung auf die Gleichstrommessung zu beziehen. Dies ist bei niedrigen Frequenzen mit dem Dreheiseninstrument möglich, bei höheren Frequenzen mit dem Thermoumformer. Das dem Bild 2.28 zugrundeliegende Transfervverfahren benutzt für die Gleichstrom- und Wechselstrommessung jeweils einen eigenen Thermoumformer. Durch einen einstellbaren Widerstand wird der Gleichstrom solange verändert, bis die auf dem Nullinstrument angezeigte Differenz der Thermospannungen zu null geworden ist und die beiden Widerstandsdrähte die gleiche Temperatur angenommen haben. Der Effektivwert des Wechselstroms ist jetzt gleich dem des Gleichstroms, der mit Hilfe des Instruments 3 direkt gemessen werden kann.

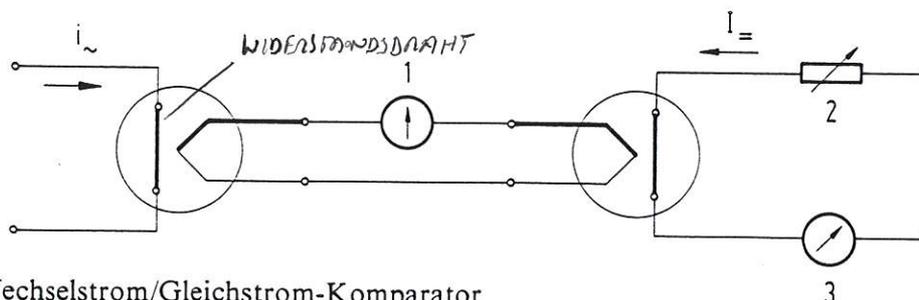
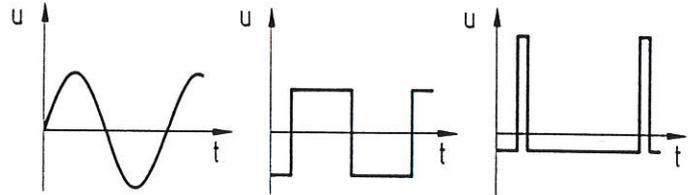


Bild 2.28: Wechselstrom/Gleichstrom-Komparator

- 1 Nullinstrument
- 2 Widerstand zur Einstellung des Gleichstroms
- 3 Meßinstrument zur Anzeige des eingestellten Gleichstroms

Vergleich eines Drehpul- und Dreheiseninstruments. Abgesehen von den konstruktiven Unterschieden mißt das Dreheiseninstrument Effektivwerte, das Drehspulinstrument Gleichrichtwerte. Dementsprechend ist bei den Drehspul-



$U_d \rightarrow$

U_{eff}	20 V	20 V	20 V
$ \bar{u} $	18 V	20 V	14 V
k	1,11	1	1,4

ANZEIGE DER
MESSGERÄTE \Rightarrow

a)

1	20 V	20 V	20 V
2	20 V	22 V	15,5 V

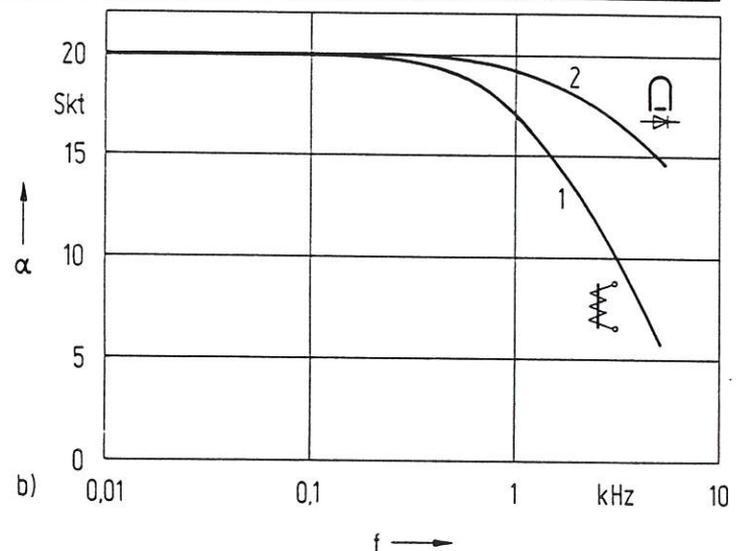


Bild 2.29:

- a) Einfluß der Kurvenform bei der Spannungsmessung
 - 1 Anzeige des Dreheiseninstruments
 - 2 Anzeige des Drehspulinstruments
- b) Einfluß der Frequenz bei der Messung von Wechselspannungen konstanter Amplituden auf die Anzeige α des Dreheiseninstruments 1 und des Drehspulinstruments 2

geräten jeweils der Kurvenformfaktor k zu berücksichtigen (Bild 2.29 a). Das Dreheiseninstrument ist dann dem Drehspulinstrument jedoch bezüglich der oberen, noch meßbaren Frequenz unterlegen (Bild 2.29 b).

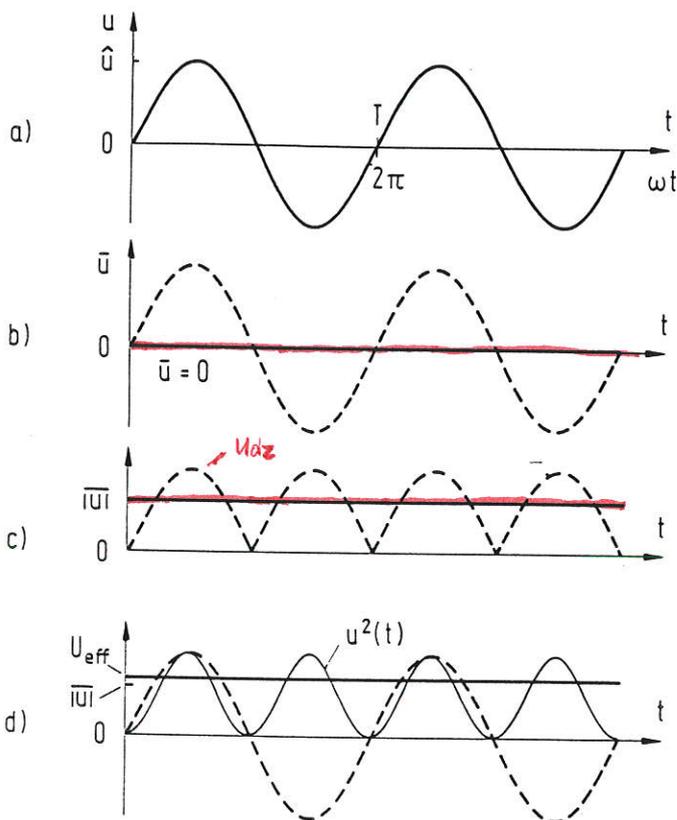


Bild 2.20: Wechselspannungsgrößen

- a) Augenblickswert
- b) linearer Mittelwert
- c) Gleichrichtwert
- d) $u^2(t)$ und Effektivwert U_{eff}

	\check{x}	\check{x}	Ψ_x	$\mu_{ x }$	
Scheitelwert	\check{x}	1	0,5	$K_c = \sqrt{2} \approx 1,414$	$\frac{\pi}{2} \approx 1,571$
Spitze-Spitze-Wert	\check{x}^{\wedge}	2	1	$2\sqrt{2} \approx 2,828$	$\pi \approx 3,141$
Effektivwert	Ψ_x	$\frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,707$	$\frac{1}{2\sqrt{2}} \approx 0,354$	1	$K_f = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1,111$
Betragsmittelungswert	$\mu_{ x }$	$\frac{2}{\pi} \approx 0,637$	$\frac{1}{\pi} \approx 0,319$	$\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \approx 0,900$	1
Crestfaktor	$K_c = \frac{\check{x}}{\Psi_x} = \sqrt{2} \approx 1,414$				
Formfaktor	$K_f = \frac{\Psi_x}{\mu_{ x }} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1,111$				

Beziehungen verschiedener Kennwerte harmonischer Signale

FORM- UND SCHEITELFAKTOR

ECHT EFFEKTIVWEIS

$$\text{Scheitelfaktor} = \frac{\text{Scheitelwert}}{\text{Effektivwert}}$$

(CRESTFAKTOR)

$$= \frac{\hat{u}}{0,707 \hat{u}} = 1,41 \text{ für sinusförmige Größen}$$

JE HÖHER DER SCHEITELFAKTOR IST, DESTO STÄRKER KANN EIN SPANNUNG VERZEIGER SEIN UND DENNOCH RICHTIG GEMESSEN WERDEN

$$\text{Formfaktor} = \frac{\text{Effektivwert}}{\text{Gleichrichtwert}}$$

$$= \frac{0,707 \hat{u}}{0,637 \hat{u}} = 1,11 \text{ für sinusförmige Größen.}$$

$$\text{Formfaktor: } f = \frac{I_{eff}}{I_{dz}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\pi}{2} = 1,11$$

$$1,11 \cdot I_{dz} = I_{eff} \quad \left(\begin{array}{l} \text{test vom Hersteller} \\ \text{eingestelltes Verhältnis} \end{array} \right)$$

$$\text{Scheitelfaktor: } s = \frac{\hat{I}}{I_{eff}} = \sqrt{2}$$

(crestfaktor)

1,11 und $\sqrt{2}$
gelten nur für
sinusförmige Signale!

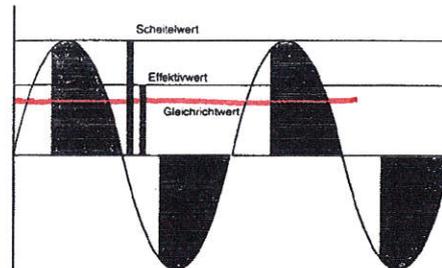
DER CRESTFAKTOR (SCHEITELFAKTOR) UND DER FORMFAKTOR SIND HERSTELLERANGABEN OZU. VOM HERSTELLER FÜR MESSGERÄTE FEST EINGESTELLTE VERHÄLTNISSSE.

IN DER MESSTECHNIK WIRD DIE ANGABE DES SCHEITELFAKTORS AUCH ZUR FESTLEGUNG DES FEHLERS DER ANZEIGE NACH GLEICHRICHTUNG NICHTSINUSFÖRMIGER GRÖSSEN BENÖTIGT.

Spannungsmessungen

Eine der meist benötigten Messungen ist die Spannungsmessung. Das Spektrum reicht von Batteriespannungen bei Kleingeräten und Kraftfahrzeugen bis zu Niederspannungsnetzen mit Dreiphasenwechselstrom.

Die Messung von Gleichspannungen ist relativ unproblematisch, wogegen die Bestimmung von Wechselspannungen je nach Kurvenform etwas aufwendiger ist. Bei Wechselgrößen ist vor allem der Effektivwert von Bedeutung.



Effektivwert, Scheitelwert und Gleichrichtwert bei einem Sinus mit Phasenanschnitt

Eine Wechselspannung mit einem Effektivwert von 230 V läßt eine Glühlampe genauso hell leuchten, wie eine Gleichspannung von 230 V.

Bei gleichem Effektivwert ist die thermische Wirkung in einem ohmschen Verbraucher unabhängig von der Kurvenform identisch.

DEFINITION

EFFEKTIVWERT

Eine gleichgerichtete sinusförmige Wechselspannung kann durch Multiplikation mit dem sogenannten Formfaktor von 1,1107 auf den Effektivwert umgerechnet werden. Nicht sinusförmige Wechselspannungen haben je nach Kurvenform unterschiedliche Formfaktoren.

FORMFAKTOR
DEFINITION

Ein Maß für die Wirksamkeit dieser elektronischen Schaltung ist der Scheitelfaktor. Er gibt an, wie das Verhältnis von Scheitelwert der Meßgröße zum Effektivwert der Meßgröße sein darf. Je höher der Scheitelfaktor ist, desto stärker kann eine Spannung verzerrt sein und dennoch richtig gemessen werden. Eine rein sinusförmige Spannung hat einen Scheitelfaktor von 1,414. Das entspricht der Quadratwurzel von Zwei.

DEFINITION
SCHEITEL-
FAKTOR

"CRESTFAKTOR"

Echt-Effektivwert

Multimeter, die den Effektivwert messen können, sind mit einem Formfaktor kalibriert. Weicht nun die Kurvenform von einem reinen Sinus ab, ändert sich der Formfaktor. Durch eine elektronische Schaltung kann dieser Formfaktor nachgebildet werden, so daß der angezeigte Wert dem Effektivwert der gemessenen Größe entspricht.

FORMFAKTOR
ELEKTRO-
NISCH
KORRIGIERT

Frequenzbereich und Genauigkeit

Die in den technischen Daten angegebenen Genauigkeiten beziehen sich immer auf einen bestimmten Frequenzbereich. Meist gelten sie bei Wechselgrößen von 50 Hz bis ca. 1 kHz. Hat die gemessene Größe eine andere Frequenz, wird sich die Genauigkeit etwas verschlechtern.

Eigenverbrauch von Meßgeräten:

Meßgerät	Eigenverbrauch	gemessener Wert
Drehspulmeßgerät	kleiner als 3 mW	arithm. Mittelwert
Kreuzspulmeßgerät	kleiner als 5 mW	Quotient
Dreheisenmeßgerät	etwa 0,5 ... 5 VA	Effektivwert
Elektrostatische Meßgeräte	nahezu Null	Effektivwert
Bimetallmeßgeräte	etwa 4 VA	Effektivwert
Hitzdrahtmeßgeräte	größer als 40 mW	Effektivwert
Thermoumformer	etwa 4 ... 40 mW	Effektivwert
Verstärkerspannungsmesser	nahezu Null	Effektivwert
Vibrationsmeßgeräte	0,5 ... 10 VA	meist Effektivwert
Schreiber	10 ... 30 mW bzw. 1,5 ... 12 VA	Frequenz
Elektrodyn. Meßwerk	2,8 W bzw. 2,8 VA	Effektivwert

Innenwiderstand von Meßgeräten

Er ist abhängig von der Meßwerkart. Drehspulmeßgeräte: 333 Ω/V; 1 kΩ/V; 10 kΩ/V; ... 100 kΩ/V
 Drehspulmeßgeräte mit eingebautem Verstärker: 1 ... 10 MΩ/V.

Abhängigkeit der Messung von der Kurvenform der Meßgröße

Bei direkten Effektivwertmessern fast keine. Drehspulmeßgeräte zeigen nur bei rein sinusförmigen Meßgrößen den Effektivwert.
 Für andere Kurvenformen muß der angezeigte Wert mit einem Korrekturfaktor multipliziert werden.

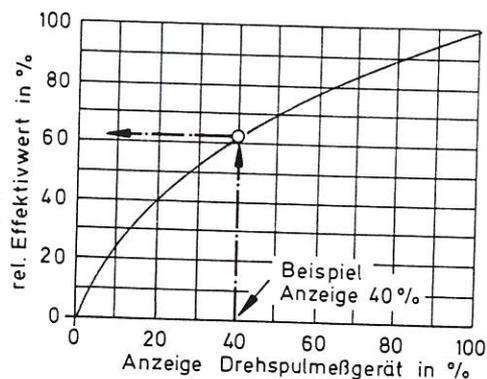
Kurvenform	Korrekturfaktor	Effektivwert / Spitzenwert
Sinus	1	0,707
Rechteck	1,41	1,0
Dreieck	0,82	0,577
Parabelspitzen	0,64	0,45
Halbellipsen	1,16	0,82
Halbkreise	1,16	0,82

① KEIN WERT VOM CHAEST-FAKTOR

Messung des Effektivwertes bei Phasenanschnittsteuerungen

Effektivwertmeßgeräte zeigen die Meßgröße direkt an.
 Anzeigen von Drehspulmeßgeräten mit Meßgleichrichter müssen korrigiert werden.

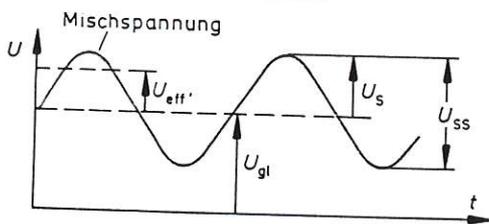
Korrekturkurve zur Ermittlung des Effektivwertes



Beispiel:

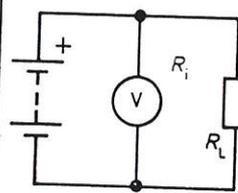
Maximalstromstärke ergibt sich bei einem Stromflußwinkel von 180°. Der Stromflußwinkel einer Anschnittsteuerung wird soweit verändert, daß das Drehspulinstrument nur noch 40% der Maximalstromstärke anzeigt. Aus der Korrekturkurve ergibt sich hierfür ein relativer Effektivwert von 61% ± 0,61. Tatsächlicher Effektivwert ist 0,61 · Maximalstromstärke.

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{U_{\text{gl}}^2 + \frac{U_{\text{s}}^2}{2}}$$



Meßschaltungen mit Zeigermeßgeräten

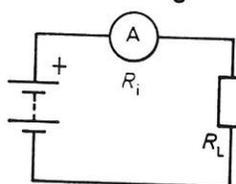
Spannungsmessung



Spannungsmesser parallel zur Meßstelle (Verbraucher R_L oder Spannungsquelle) schalten.

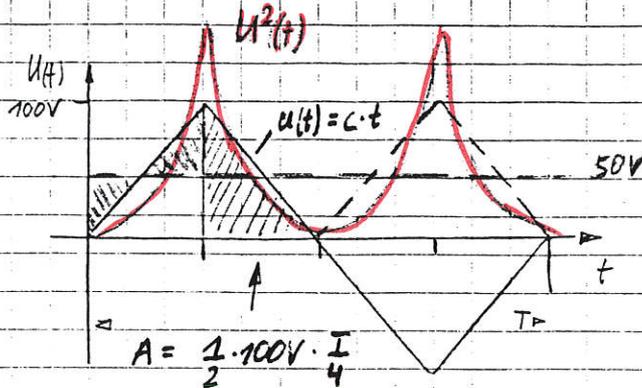
$$R_i = \text{möglichst groß}$$

Strommessung



Strommesser in den Stromkreis (in Reihe zum Verbraucher R_L) schalten.

$$R_i = \text{möglichst klein}$$

BEISPIEL FÜR EINE NICHTSINUSFÖRMIGE GRÖSSEBeispiel:

Ges: a) Gleichrichtwert (2 Weg)

b) Effektivwert

c) Formfaktor

d) Scheitelfaktor

zu a)

das wahre dc Gleichrichtwert

$$\text{oder: } U_{dz} = \frac{1}{T} \cdot 4 \int_0^{\frac{T}{4}} c \cdot t \, dt$$

$$U_{dz} = \frac{1}{T} \cdot 4 \int_0^{\frac{T}{4}} \frac{100V}{\frac{T}{4}} \cdot t \, dt = \frac{4}{T} \cdot c \cdot \frac{1}{2} t^2 \Big|_0^{\frac{T}{4}}$$

$$U_{dz} = \frac{4}{T} \cdot \frac{100V}{T} \cdot 4 \cdot \frac{1}{2} \frac{T^2}{16} = \underline{\underline{50V}}$$

zu b)

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot 4 \int_0^{\frac{T}{4}} c^2 t^2 \, dt}$$

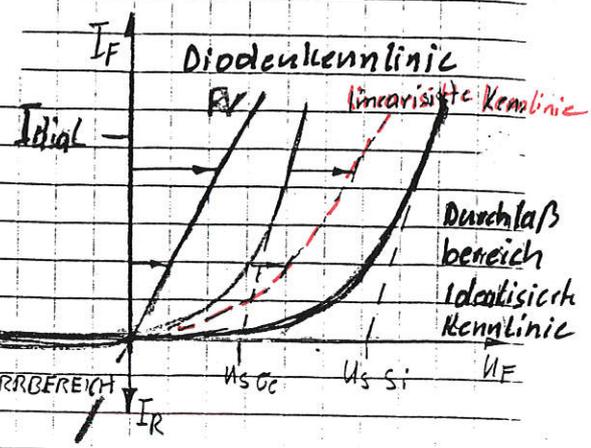
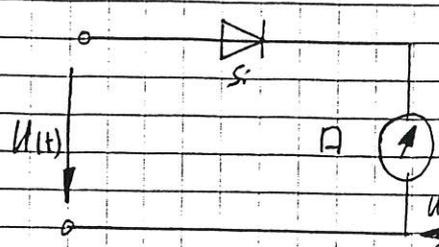
$$U_{eff} = \sqrt{\frac{4c^2}{T} \cdot \frac{1}{3} t^3 \Big|_0^{\frac{T}{4}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 10^4}{T^3} \cdot 16 \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{T^3}{64}} = \frac{100V}{\sqrt{3}} = \underline{\underline{57,7V}}$$

$$\text{zu c) } f = \frac{U_{eff}}{U_{dz}} = \frac{57,7V}{50V} = \underline{\underline{1,154}}$$

$$\text{zu d) } S_n = \frac{\hat{u}}{U_{eff}} = \frac{100V}{\frac{100V}{\sqrt{3}}} = \underline{\underline{\sqrt{3}}}$$

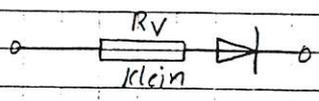
REALE GLEICHRICHTER

Einweggleichrichter:



Wenn U_{eff} max 0,6V ist, keine Anzeige. daraus folgt, das für messen kleine Spannungen der Einweggleichrichter mit Si-Diode zB. nicht das richtige ist, da auch der Sinusverlauf verfälscht wird!

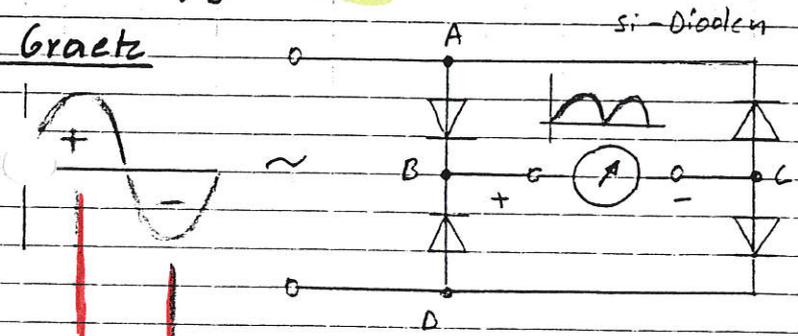
U_S für Ge \approx 0,3V
 U_S für Si \approx 0,7V



hiermit erreicht man eine linearisierte Kennlinie!

Zweiweggleichrichter:

1) Graetz



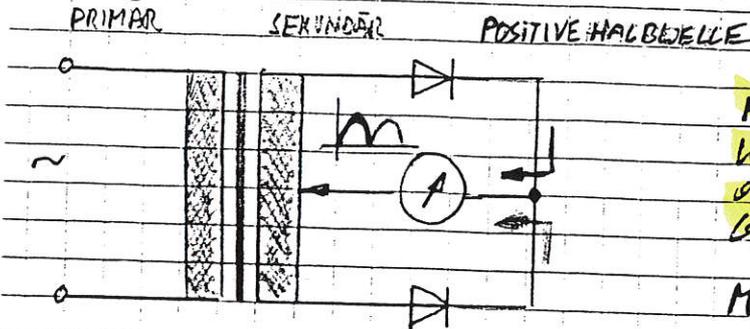
läuft über die Punkte: A B C D

läuft über die Punkte: D B C A

als positive Halbwelle in Gegenrichtung

Es entstehen pro Halbwelle bei Silizium-Dioden schon ca 1,2V Verlust, dh für kleine Spannungen entsteht eine große Verfälschung.

2) Trafo mit Mittelabgriff

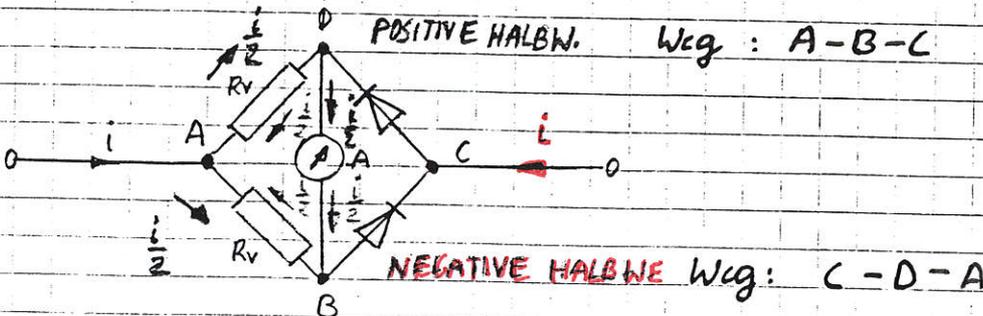


Hier hat man nur einmal ein U_s von zB 0,7V, wobei man den Aufwand im Verhältnis zur Leistungserhaltung sehen muß.

Messen kleine Spannungen möglich.

Als Vorteil für die Messung ist auch die galvanische Trennung zu sehen.

Modifizierte Graetzgleichrichter:



Die Anzeige bekommt hierbei nur den halben Wert des Stromes. Der Innenwiderstand muß sehr klein gegenüber den RV's sein. Man kann kleine Spannungen messen!

Spitzengleichrichtung (MESSUNG DES SCHEITELWERTES)

Bei Spitzengleichrichtung wird eine Kapazität über eine Diode auf den positiven oder negativen Extremwert einer Wechselfspannung aufgeladen, bei sinusförmiger Wechselfspannung im Idealfall auf den Scheitelwert U_0 (Bild 9.5 a).

Bei realen Gleichrichterdioden ist der erhaltene Spitzenwert mindestens um die minimale Durchlaßspannung der Diode vermindert. Außerdem sinkt bei Belastung der Kapazität C mit einem Lastwiderstand R die Spannung innerhalb einer Periode exponentiell um einen Anteil $\Delta U/U_0$ ab, der durch die Zeitkonstante RC und die Periodendauer T des Meßsignals gegeben ist (Bild 9.5 b). Für $T \ll RC$ gilt

$$\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{U_0 - U}{U_0} = 1 - \frac{U}{U_0} =$$

$$\frac{\Delta U}{U_0} = 1 - e^{-T/RC} \approx \frac{T}{RC}$$

ABSINKEN DER SPANNUNG
INNERHALB EINER PERIODE
BEI LAST

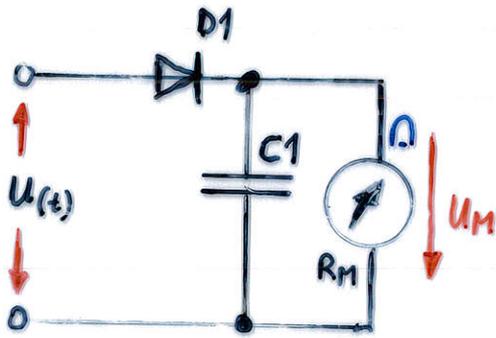
$$\tau = R \cdot C$$

$$\frac{\Delta U}{U_0} = 1 - e^{-\frac{T}{\tau}} \approx \frac{T}{\tau}$$

U₀ IDEAL WIRD NICHT ERREICHT DA:

1. DIE DURCHLAßSPANNUNG (CA. 0,6V) DER DIODE U₀ VERMINDELT
2. WENN C MIT EINEM LASTWIDERSTAND R BELASTET WIRD SINKT U₀ ANTEILMÄSSIG AB SIEHE $\frac{\Delta U}{U_0} = \dots$

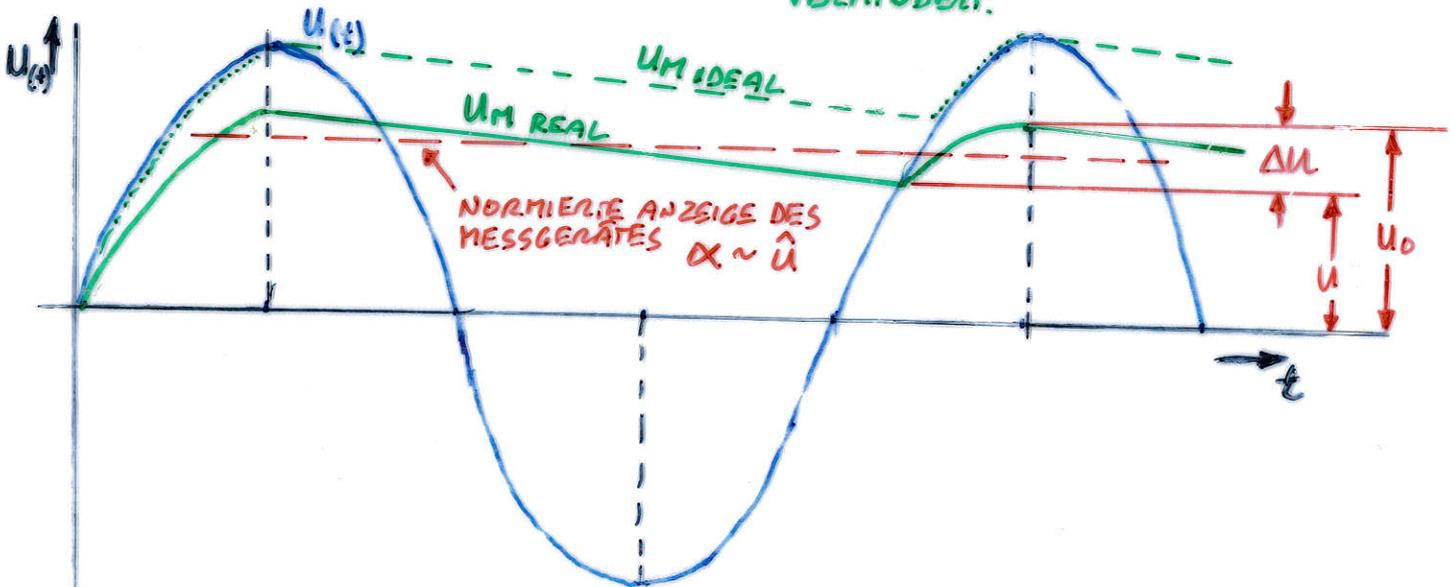
SPITZENGLEICRICHTUNG (MESSUNG DES SCHEITELWERTES)



EINWEGGLEICHRICHTUNG

MESSUNG DES SPITZENWERTES
EINER WECHSELSPANNUNG
MIT EINEM DREHSPULMESS-
GERÄT.

BEI REALEN GLEICHRICHTERDIODEN
IST DER ERHALTENE SPITZENWERT
MINDESTENS UM DIE MINIMALE
DURCHLASSPANNUNG DER DIODE
VERMINDELT.



ABSINKEN DER SPANNUNG INNERHALB EINER PERIODE:

$$\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{U_0 - U}{U_0} = 1 - \frac{U}{U_0} = 1 - e^{-\frac{T}{R_M \cdot C_1}} \approx \frac{T}{R_M \cdot C_1} \approx \frac{T}{\tau}$$

$$\tau = R_M \cdot C_1$$

BEISPIEL:

GEG.: $f = 10 \text{ KHz} \Rightarrow T = 0.1 \text{ ms}$

$$\left. \begin{array}{l} R_M = 100 \text{ k}\Omega \\ C_1 = 100 \text{ nF} \end{array} \right\} \Rightarrow \tau = R_M \cdot C_1 = 100 \text{ k}\Omega \cdot 100 \text{ nF} = 10 \text{ ms}$$

GES: RESTWEILIGKEIT

$$\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{T}{R_M \cdot C_1} = \frac{T}{\tau} = \frac{0.1 \text{ ms}}{10 \text{ ms}} = 0.01 \hat{=} \underline{\underline{1\%}}$$

ALS BRUMMSPANNUNG BEZEICHNET MAN DIE FEHLEDIFFERENZ
ZWISCHEN NORMIERTE ANZEIGE UND DEM TATSÄCHLICHEN
SPITZENWERT.

• JE GRÖßER DAS SIGNAL, DESTO BESSER DAS MESSEERGEBNIS!

• JE GRÖßER DER KONDENSATOR, DESTO BESSER BZW. KLEINER IST DIE
BRUMMSPANNUNG

NACHTEIL: IST DER KONDENSATOR ZU GROSS, DAUERT ES ZU LANGE
BIS ER AUFGELADEN IST.

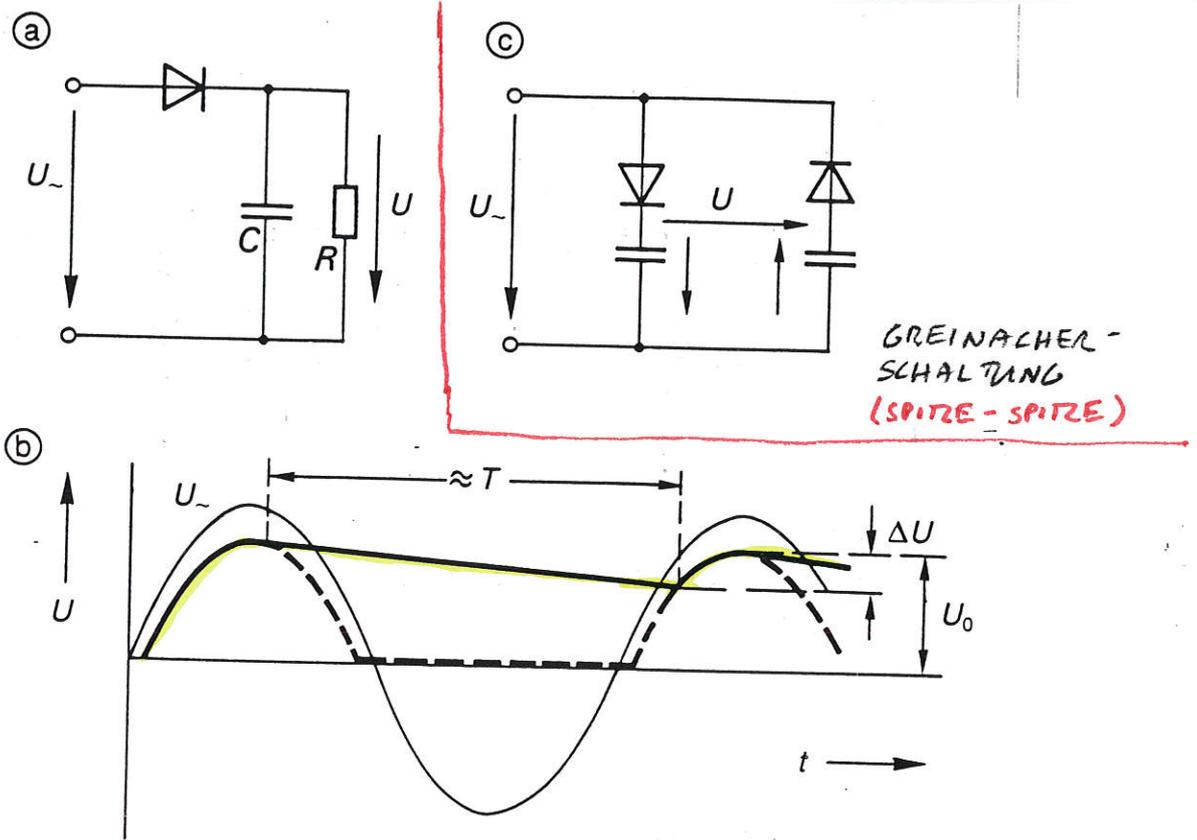


Bild 9.5. Spitzenwertgleichrichtung.

- a) Prinzip,
- b) Restwelligkeit,
- c) Greinacherschaltung (Spitze-Spitze-Wert).

BEISPIEL:

Bei einer Frequenz von 10 kHz ($T = 0,1 \text{ ms}$) und einer Zeitkonstanten von $RC = 100 \text{ k}\Omega \cdot 100 \text{ nF} = 10 \text{ ms}$ ergibt sich für die Restwelligkeit $\Delta U / U_0 = 1\%$.

Der Spitze-Spitze-Wert einer Wechselspannung kann mit der Greinacher-Schaltung nach Bild 9.5c) bestimmt werden, die bei sinusförmigen Wechselspannungen im Idealfall zu einer Verdoppelung des Scheitelwertes auf den Wert $2 U_0$ führt. Spitzenwertgleichrichtung wird im besonderen bei höheren Frequenzen angewendet.

$$\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{T}{R \cdot C}$$

$$\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{0,1 \text{ ms}}{10 \text{ ms}}$$

$$\frac{\Delta U}{U_0} = 0,01$$

$$\Delta U = 0,01 \cdot U_0$$

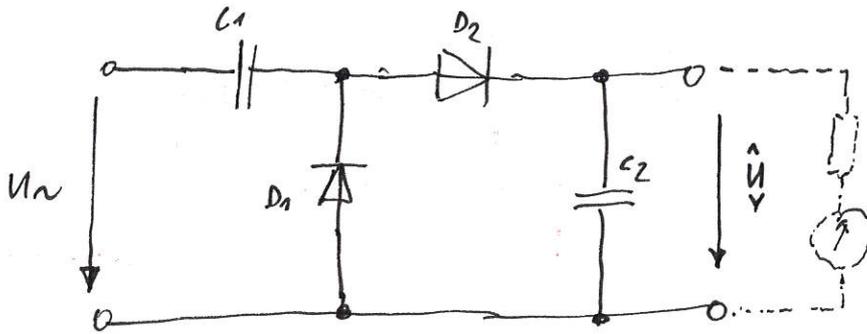
o JE GRÖßER DAS SIGNAL, DESTO BESSER DAS MESSERGEBNIS

o JE GRÖßER DER KONDENSATOR, DESTO BESSER BZU. KLEINER IST DER UNTERSCHIED ZWISCHEN DEM TATSÄCHL. SEITE 61

SPITZENWERT UND DER

ANZEIGE NACHTEIL: IST DER KONDENSATOR ZU GROSS, DAUERTE ES BU LANGE BIS ER AUFGELODEN IST.

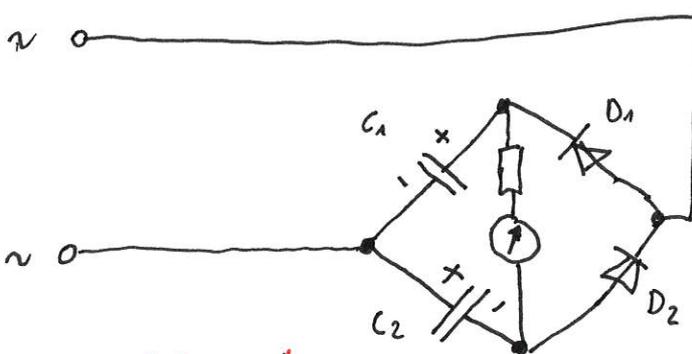
1 PULSVERDOPPELSCHALTUNG



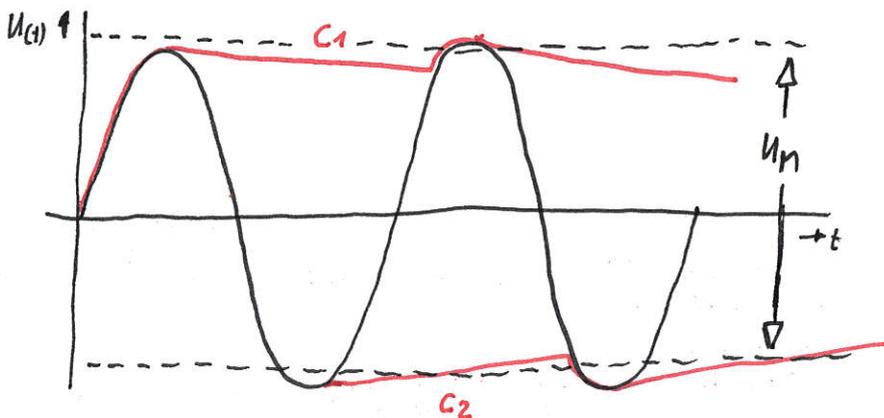
=> VILLARD-SCHALTUNG
(SPANNUNGSVERVIELFACHER)

2 PULSVERDOPPELSCHALTUNG

BEISPIEL "C" UMGEZEICHNET:



=> DELON ~~BRIDGE~~ SCHALTUNG
(SPANNUNGSVERVIELFACHER)



Messung des Scheitelwerts; Spitzenwertgleichrichtung.

Um den Scheitelwert zu messen, ist er zunächst zu speichern. Dazu dient der in Bild 2.21 gezeichnete Kondensator. Er wird über die Diode auf die Spannung U_C aufgeladen, die gleich dem Spitzenwert der angelegten Spannung, vermindert um die Schwellspannung der Diode von etwa 0,7V ist; $U_C = \hat{u} - 0,7V$. U_C wird mit dem parallel liegenden Drehspulinstrument erfaßt. Über den hohen Widerstand R_M des Meßinstruments entlädt sich der Kondensator etwas, bis seine Spannung mit der nächsten ansteigenden Signalfanke wieder ihren Maximalwert erreicht.

In der Schaltung von Bild 2.21 wird der Kondensator nur während der positiven Halbwelle aufgeladen und mißt so nur die positive Scheitelspannung \hat{u}_+ .

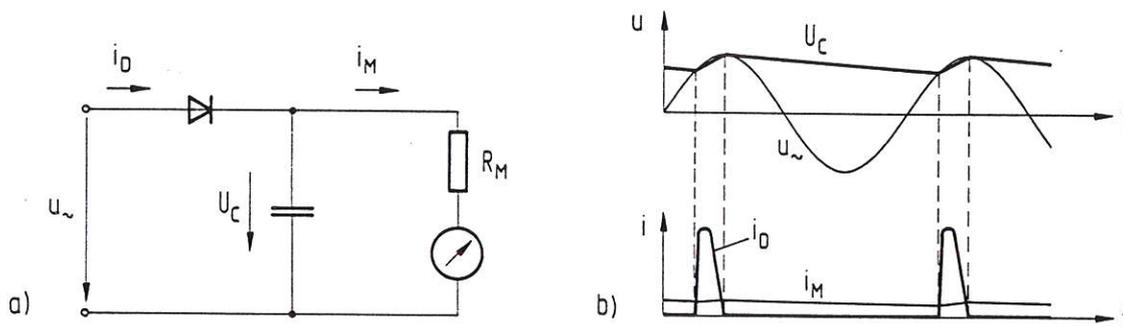


Bild 2.21: Spitzenwert-Gleichrichtung

a) Schaltung

b) zeitlicher Verlauf der Spannungen und Ströme

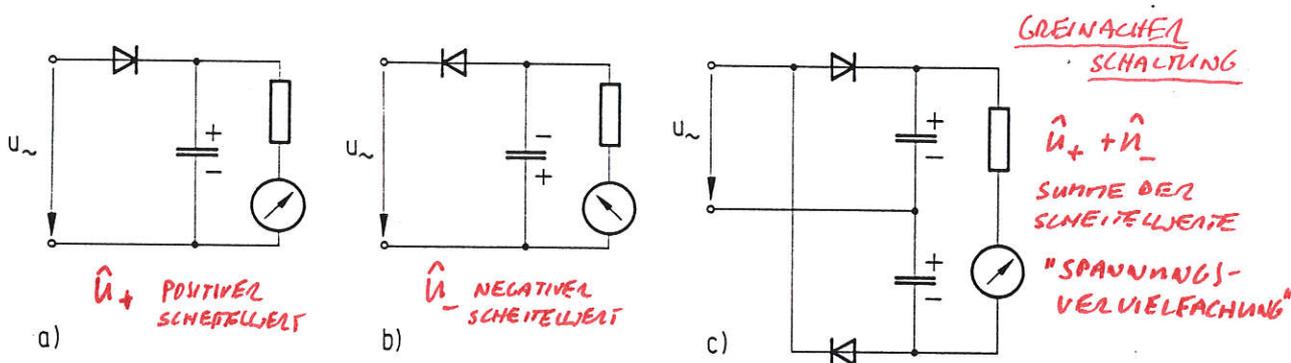
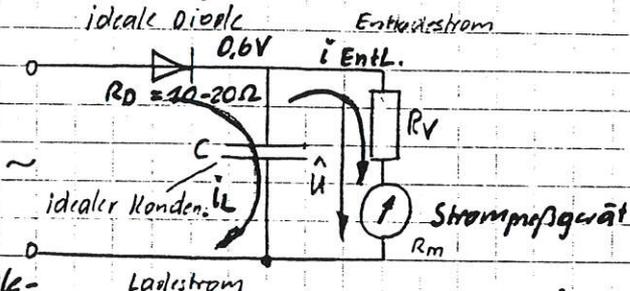


Bild 2.22: Messung (a) des positiven Scheitelwerts \hat{u}_+ , (b) des negativen Scheitelwerts \hat{u}_- und (c) der Summe der Scheitelwerte $\hat{u}_+ + \hat{u}_-$

Messung der Spitzenwerte

Die Spitzen müssen gespeichert werden, sofern man nicht mit Oszilloskop oder Graph arbeitet.



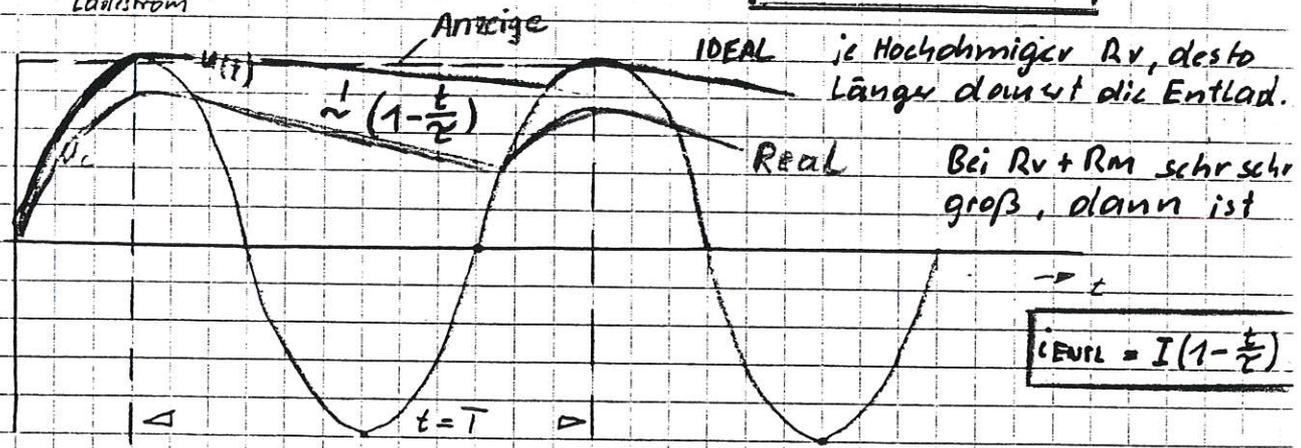
$$i_{Entl.} = I \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\tau = R \cdot C$$

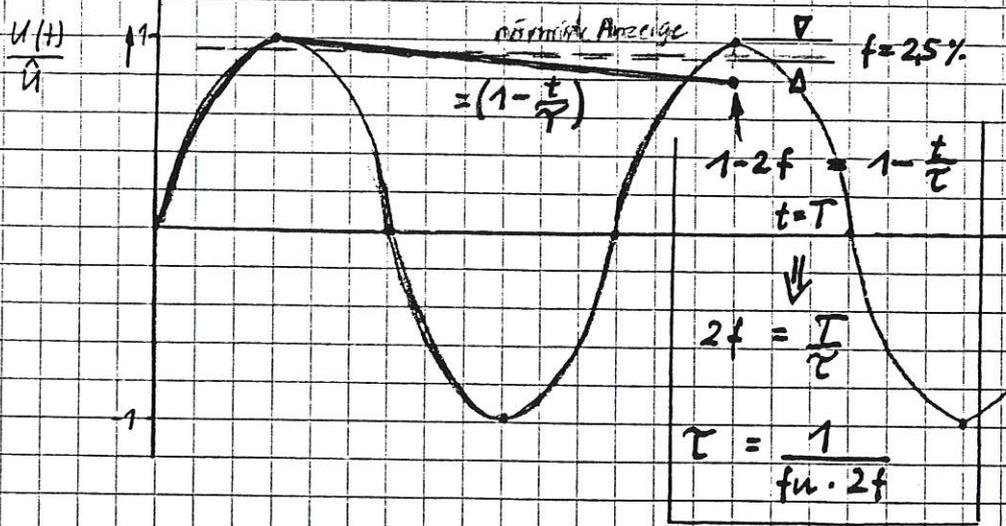
$$\tau = (R_v + R_m) \cdot C$$

ideale Bauelemente angeno.

Bei einem auf Gleichspannung eingestellten Volttaeinstrument zeigt sich folgende Anzeige!



Die Anzeige nähert sich dem Spitzenwert, je größer der Kondensator und die Widerstände sind!



Beispiel:
 $I_m = 10 \mu A$, $U_m = 60 mV$
 $U(t) \rightarrow U_{eff} = 10V$
 Ges: $f_u = 100 Hz$
 max Fehler 2,5 % = f

BRUMM-SPANNUNG = DIFFERENZ
 ZWISCHEN NORMIERTE ANZEIGE
 UND TATSÄCHLICHEM SPITZENWERT
 = SIE IST EIN MASS FÜR DEN DOPPELTEN ABSOLUTEN
 FEHLER

$$\hat{u} = \sqrt{2} \cdot U_{eff} = 14,1V$$

$$\hat{u} = (R_M + R_V) \cdot I_M$$

$$14,1V = \frac{60mV}{10\mu A} + R_V \cdot I_M$$

$$14,1V = \left(\frac{60mV}{10\mu A} + R_V \right) \cdot 10\mu A$$

$$\underline{R_V} = \frac{\hat{u}}{I_M} - R_M = \underline{1,4 M\Omega}$$

idielle Rechnung!

$$\tau = (R_V + R_M) \cdot C = \frac{1}{2f_n \cdot f}$$

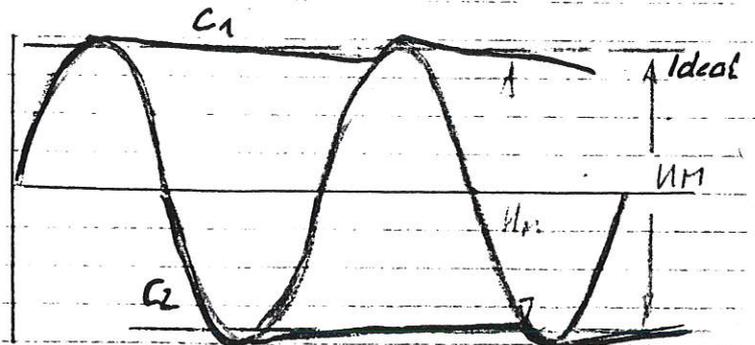
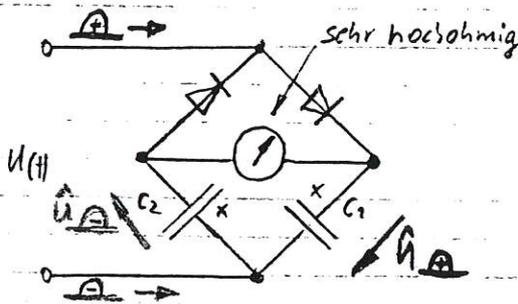
$$C = \frac{1}{2f \cdot f_n (R_V + R_M)}$$

$$\underline{C} = \frac{1}{0,05V \cdot 100 Hz (1,4M\Omega + 6k\Omega)} = \underline{141 nF}$$

Im Realfall, das heißt sei $U_0 = 0,6V$ und $R_0 = 10 \dots 20\Omega$ würde das Laden verzögert, wodurch es mehrere Halbwellen dauern würde, bis das wir den Spitzenwert erreicht hätten, da der Kondensator nicht direkt aufgeladen (voll aufgeladen) wird!

Man kann also nur Signale mit großer Amplitude Fehlerarm messen!

Spitze - Spitze - Messung



Delon - Schaltung
(Spannungsverdoppler)

[oder Villard - Schaltung]

DELON- / VILLARD - SCHALTUNGEN SIND
SPANNUNGSVERVIELFACHERSCHALTUNGEN

Kapazitive Spannungsmessung/- indikation

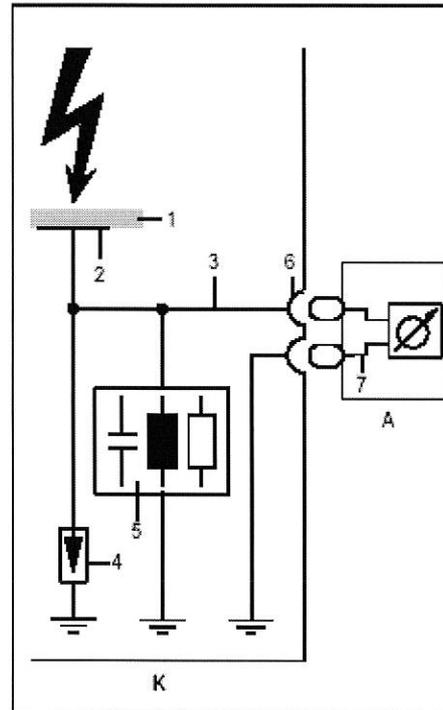
Kapazitive Anzeigesysteme

Entsprechend DIN VDE 0682 Teil 415 (IEC/EN 61243-5) werden Spannungsprüf-systeme eingeteilt in:

- **integrierte Systeme**, die in der Schaltanlage fest eingebaut und Bestandteil dieser sind.
- **steckbare Systeme**, in denen ein ortsveränderliches Anzeigegerät über eine Schnittstelle mit einem fest eingebauten Koppelteil (z.B. DEHNcap/ MDS, DEHNcap/M) verbunden werden kann.

Bei steckbaren Spannungsprüfsystemen unterscheidet man zwischen

- **passiven Anzeigegeräten** (z. B. DEHNcap/P) Diese Anzeigegeräte entnehmen die Energie dem Messkreis.
- **aktiven Anzeigegeräten** (z. B. DEHNcap/A) Diese Anzeigegeräte besitzen eine integrierte Energieversorgung und eine Eigenprüfvorrichtung.



Kapazitives Spannungsanzeigesystem für Hochspannungsanlagen, Prinzipschaltung

- 1 aktives Teil der Hochspannungsanlage
- 2 Koppelkapazität (Koppelelektrode mit Koppeldielektrikum)
- 3 Verbindungsleitung
- 4 spannungsbegrenzende Sollbruchstelle
- 5 Messbeschaltung
- 6 Messpunkt
- 7 Anschlussleitung

K Koppelteil DEHNcap/MDS,
DEHNcap/M

A Anzeigegerät DEHNcap/...

