

E26 Effektivwerte, Thyristor und Triac

Grundlagen

Zur Quantifizierung von Wechselspannungen kann deren Effektivwert genutzt werden¹. Dieser ist definiert als die Gleichspannung U_{eff} , die an einem ohmschen Verbraucher die gleiche Arbeit leistet² wie die ihr entsprechende Wechselspannung im zeitlichen Mittel über eine volle Periode. Es gilt also

$$W_{AC} = \frac{1}{R} \int_0^T U^2(t) dt = W_{DC} = \frac{1}{R} U_{eff}^2 T \quad (1)$$

Benutzt man besser den Phasenwinkel $\varphi = \omega t$ erhält man für den Effektivwert

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U^2(\varphi) d\varphi}. \quad (2)$$

Für eine einfache sinusförmige Wechselspannung $U(\varphi) = U_0 \sin \varphi$ erhält man die bekannte Beziehung $U_{AC} = U_{eff} = U_0/\sqrt{2}$.

Ist der Wechselspannung eine Gleichspannung U_{DC} überlagert³, erhält man die Beziehung

$$U_{eff}^2 = U_{DC}^2 + U_{AC}^2. \quad (3)$$

Einfache Wechselspannungsmessgeräte messen den sogenannten Gleichwert der Wechselspannung. Er wird mit

$$U_{GW} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |U(\varphi)| d\varphi \quad (4)$$

berechnet. Die Betragsbildung erfolgt messtechnisch durch eine Vollwellengleichrichtung der Wechselspannung. Für den Gleichwert erhält man bei einer rein sinusförmigen Spannung $U_{GW} = 2U_0/\pi$. Er ist damit um den sogenannten Formfaktor $k_F = U_{eff}/U_{GW} = 1,11$ kleiner als der Effektivwert und wird in dieser Höhe bei der Kalibrierung des Messgerätes berücksichtigt, so dass bei sinusförmigen Spannungen der richtige Effektivwert angezeigt wird. Messungen nicht sinusförmiger Spannungen können demzufolge je nach Wert des Formfaktors stark fehlerbehaftet sein.

Bei True-RMS⁴ Messgeräten wird die Beziehung (2) analog oder digital umgesetzt, so dass man den richtigen Effektivwert, unabhängig von der Kurvenform, erhält.

Oftmals wird bei Wechselspannungsmessungen ein möglicher Gleichspannungsanteil U_{DC} unterdrückt und nur der

¹Da bei ohmscher Last der Strom proportional zur Spannung ist, gelten alle Ausführungen gleichermaßen für Strom und Spannung.

²Gemeint ist die Arbeit, die durch den Stromfluss durch die ohmsche Last geleistet wird.

³Der Gleichspannungs- oder Offsetwert U_{DC} ist gleich dem zeitlichen Mittel der Wechselspannung.

⁴root mean square

verbleibende Wert für U_{AC} angezeigt. Mittels (3) kann dann U_{eff} berechnet werden.

Zur Leistungssteuerung von Verbrauchern⁵, die mit Wechselspannung betrieben werden, kann eine Phasenanschnittsteuerung benutzt werden. Wie in Abbildung 1 dargestellt,

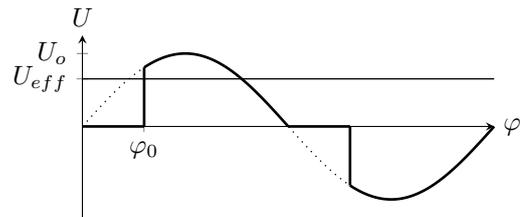


Abbildung 1: Phasenanschnitt der positiven und negativen Halbwelle mit Triac

wird in jeder Halbwelle nach dem Phasenwinkel φ_0 nach dem Nulldurchgang der nicht angeschnittenen Spannung diese bis zum nächsten Nulldurchgang zugeschaltet. Dies kann für die positive und die negative Halbwelle mit einem Triac, oder, wenn nur eine Halbwelle genutzt werden soll, mit einem Thyristor realisiert werden.

Ein Thyristor ist eine Vierschichtdiode, die neben der Anode und der Kathode über einen herausgeführten Steuerungseingang, das Gate, verfügt. Die Kennlinie eines Thyristor ist in Abbildung 2 dargestellt.⁶ Wie bei einer gewöhnlichen Diode fließt bei Polung in Sperrrichtung nur ein sehr kleiner Sperrstrom, der bei Überschreiten der maximalen Sperrspannung U_{RM} steil ansteigt und zur Zerstörung des Thyristors führt.

In Durchlassrichtung fließt zunächst ebenfalls nur ein geringer Sperrstrom, der Thyristor blockiert. Bei Erhöhung der Spannung bis zur Nullkippspannung U_{DM} zündet der Thyristor schlagartig, er wird niederohmig. Üblicherweise wird der Thyristor bei kleineren Spannungen als U_{DM} betrieben. Die Zündung kann dann durch einen Strom in das Gate erfolgen. Der sich einstellende Strom I_F hängt von der Außenbeschaltung ab und fließt trotz der nur noch kleinen Restspannung U_F zwischen Anode und Kathode weiter.

Zum Löschen des Thyristors muss der Strom I_D den Haltestrom I_H zumindest kurzzeitig unterschreiten.

Eine symmetrische Kennlinie erhält man im Prinzip durch die Antiparallelschaltung zweier Vierschichtdioden oder Thyristoren, praktisch durch eine Fünfschichtdiode. Ein solches Bauelement bezeichnet man als Diac, oder, wenn eine gemeinsame Gateelektrode vorhanden ist, als Triac.

⁵z. B. Regelung der Drehzahl von Motoren, der Helligkeit von Leuchtmitteln, der Heizleistung usw.

⁶Die Kennlinie der Vierschichtdiode entspricht der Kennlinie des Thyristors für $I_G = 0$.

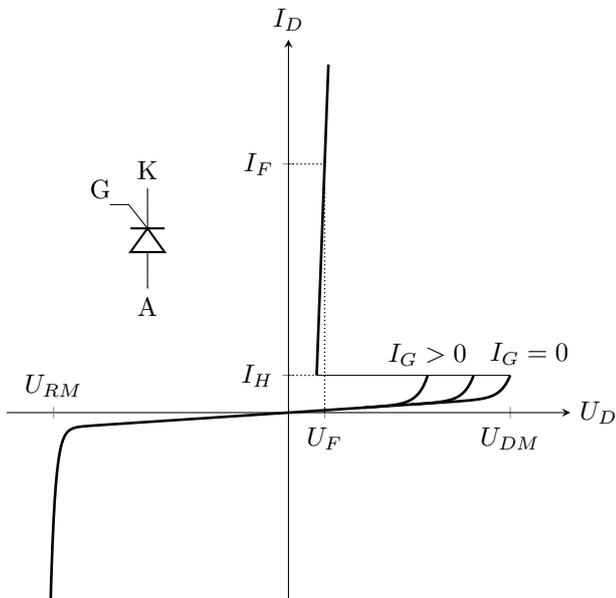


Abbildung 2: Schaltzeichen und Kennlinie eines Thyristors

In der Abbildung 3 ist die Schaltung für eine Wechselstromzündung eines Triacs dargestellt. Ersetzt man zunächst

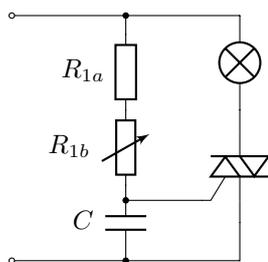


Abbildung 3: einfache Schaltung zur Phasenanschnittsteuerung mit Triac

den Kondensator C durch einen Widerstand R_2 hat man eine reine Vertikalsteuerung. Der Zündzeitpunkt verschiebt sich, wenn durch den Spannungsteiler bedingt, die am Gate anliegende Wechselspannung kleiner wird, da der erforderliche Zündstrom erst nach Erreichen der zugehörigen Gatespannung U_G nach dem Nulldurchgang zur Verfügung steht. Der maximal erreichbare Ansnchnittwinkel φ_0 beträgt 90° .

Belässt man den Kondensator, bildet dieser mit dem Widerstand $R_1 = R_{1a} + R_{1b}$ ebenfalls einen Spannungsteiler. Darüber hinaus wird aber die geteilte Spannung um maximal weitere 90° verschoben, was einer Horizontalsteuerung entspricht. Letztlich steht nahezu der volle Regelbereich von 0° bis 180° zur Verfügung.

Das Löschen des Triacs erfolgt automatisch bei jedem Nulldurchgang, da der Haltestrom unterschritten wird.

Versuchsvorbereitung

- Aufbau und Verwendung von Diacs, Thyristoren und Triacs
- Berechnen Sie Effektivwert U_{eff} , Gleichrichtwert U_{GW} , Gleichspannungsanteil U_{DC} und den Formfaktor k_F einer mit dem Phasenwinkel φ_0 mit einem Triac und

einem Thyristor angeschnittenen Wechselspannung (Abbildung 1). Berechnen Sie Werte für $\varphi = 0$.

- Wie groß ist der Fehler der Messung des Effektivwertes einer symmetrischen Dreieckspannung ohne Verwendung eines True-RMS-Messgerätes.
- Berechnen Sie den Ansnchnittwinkel φ_0 bei reiner Vertikalsteuerung in Abhängigkeit des Widerstandsverhältnisses R_1/R_2 .

Die zur Zündung erforderliche Spannung U_G betrage $U_G = 0,1 \text{ V}$, die Amplitude der Wechselspannung $U_0 = \sqrt{2} \cdot 12 \text{ V}$.

Mit welchem Widerstandsverhältnis $(R_1/R_2)_{max}$ erhält man die maximal mögliche Phasenverschiebung?

Skizzieren Sie den Verlauf $\varphi_0(R_1/R_2)$ im Bereich $(R_1/R_2) = 0 \dots (R_1/R_2)_{max}$.

- Rumford-Photometer, Fettfleck-Photometer

Aufgaben

- Bestimmen Sie den Effektivwert einer Wechselspannung durch Helligkeitsvergleich zweier gleichartiger Glühlampen, welche zum einen mit der Wechselspannung, zum anderen mit einer dem Effektivwert entsprechenden Gleichspannung betrieben werden.
- Messen Sie mit verschiedenen im Praktikum vorhandenen Messgeräten an einer sinusförmigen Wechselspannung mit und ohne enthaltenen Gleichanteil. Vergleichen Sie mit (3).
- Bestimmen Sie ohne Verwendung eines True-RMS-Messgerätes den Effektivwert einer Dreieckspannung.
- Messen Sie die wesentlichen Bestandteile der Kennlinie in Abbildung 2 für einen Thyristor. Bestimmen Sie insbesondere $I_F(U_F)$ und I_G bzw. U_G .
Machen Sie sich mit der Funktion des Thyristors vertraut.
- Bauen Sie die Schaltung nach Abbildung 3 mit einem Triac und einem Thyristor zunächst mit reiner Vertikalsteuerung für einen Regelbereich von $\varphi_0 \approx 0^\circ$ bis $\varphi_0 \leq 45^\circ$ auf. Überprüfen Sie die Funktion des Schaltung.
Erweitern Sie die Schaltung um eine Horizontalsteuerung.
Messen Sie den Effektivwert der Spannung an der Glühlampe in Abhängigkeit des gemessenen Ansnchnittwinkels. Vergleichen Sie mit den zu erwartenden Werten.
- Untersuchen Sie die Spannung am Verbraucher hinsichtlich zu erwartender Oberwellen.