

Quellen (aktive Zweipole) und Grundstromkreis

Studiengang/Set: Praktikumsplatz-Nr.: Datum:

Testat:

Teilnehmer 1:
(Protokollant) (Blockschrift) (Unterschrift)

Datum:

Teilnehmer 2:
(Blockschrift) (Unterschrift)

.....
Unterschrift

1 Allgemeines

1.1 Erforderliche Grundlagen und Begriffe

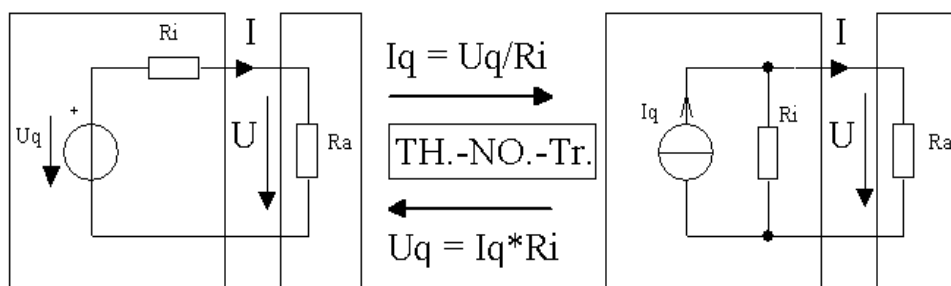
IU-Kennlinie von Quellen (aktive Zweipole), Quellenersatzschaltung, Innenwiderstand, THÈVENIN-Äquivalent (Spannungsquellenersatzschaltbild), NORTON-Äquivalent (Stromquellenersatzschaltbild), THÈVENIN-NORTON-Transformation, Leerlauf, Kurzschluss, Grundstromkreis, Arbeitsgerade, Arbeitspunkt, KIRCHHOFFsche Sätze, Strom- und Spannungsteilregel, Leistung, Wirkungsgrad, Leistungsanpassung

Theoretische Grundlagen

Spannungsquellen

Eine **ideale** Spannungsquelle ist durch die Unabhängigkeit ihrer an den Klemmen (Polen) zu messenden **Klemmenspannung** U vom Klemmenstrom I gekennzeichnet.

Bei einer **realen** Spannungsquelle tritt ein mehr oder weniger starkes Absinken der Klemmenspannung bei steigendem Klemmenstrom auf. Dieses Verhalten lässt sich durch ein **Ersatzschaltbild** beschreiben, in dem die reale Spannungsquelle durch die Reihenschaltung einer idealen Spannungsquelle mit der Quellenspannung U_q und einem OHMschen Widerstand R_i dem sogenannten **Innenwiderstand**, ersetzt wird (**THÈVENIN-Äquivalent**). Eine ideale Spannungsquelle hat den Innenwiderstand Null und ihre Klemmenspannung U ist immer identisch mit der Quellenspannung U_q ! Bei angeschlossenem Außenwiderstand R_a (auch als Lastwiderstand bezeichnet) ist die Klemmenspannung identisch mit dem Spannungsabfall U über R_a und stets kleiner als U_q .



a) THÈVENIN-Äquivalent

b) NORTON-Äquivalent

Bild 1 Quellen (aktive Zweipole) im Grundstromkreis
a) reale Spannungsquelle (THÈVENIN-Äquivalent)
b) reale Stromquelle (NORTON-Äquivalent)

Unter Berücksichtigung der Zählpfeilrichtung ergibt sich aus Bild 1 a) allgemein nach der Maschenregel:

$$\text{Masche 1 (M1):} \quad U_q - IR_1 - IR_a = 0$$

$$\text{Masche 2 (M2):} \quad U - IR_a = 0$$

$$\text{Daraus folgt nun:} \quad U = IR_a = U_q - IR_1$$

Ist $I = 0$, wie es bei Leerlauf ($R_a \rightarrow \infty$) an den Klemmen der Fall ist, ergibt sich für die Klemmenspannung

$$U = U_1 = U_q \quad (\text{Leerlaufspannung} = \text{Quellenspannung!}).$$

Die Klemmenspannung U einer realen Spannungsquelle ist nur dann gleich der Quellenspannung U_q , wenn kein Strom aus der Quelle fließt, die Quelle also nicht belastet wird:(Leerlauf)! Sie wird deshalb auch als Leerlaufspannung U_1 bezeichnet.

Um den zur Ermittlung der Klemmenspannung benötigten Innenwiderstand der Ersatzspannungsquelle zu bestimmen, wird die Klemmenspannung bei verschiedenen Stromstärken gemessen. Wurde zuvor die Leerlaufspannung bestimmt, kann nach der letzten Gleichung dann der Innenwiderstand berechnet werden, da sich für U z.B. mit der Spannungsteilerregel ergibt:

$$U = U_q \cdot \frac{R_a}{R_a + R_i} \quad ()$$

Stromquellen

Für die Stromquelle gilt, dass der Strom einer **idealen Stromquelle** vom Spannungsabfall am Verbraucher (Lastwiderstand) unabhängig ist, eine Tatsache, die bei der realen Stromquelle nicht mehr erfüllt ist. Der Strom, den eine ideale Stromquelle abgibt, wird mit **Quellenstrom I_q** (Bild 1 b) bezeichnet. Er ist identisch mit dem Klemmenkurzschlussstrom, der fließt, wenn die reale Quelle an den Klemmen kurzgeschlossen wird ($R_a = 0$).

Das Ersatzschaltbild der Stromquelle (**NORTON-Äquivalent**) besteht aus der Parallelschaltung einer idealen Stromquelle mit einem Widerstand R_i , der sich nach dem THÈVENIN-NORTON-Theorem zu der gleichen Größe ergibt, wie der der äquivalenten Spannungsquellenersatzschaltung (THÈVENIN-Äquivalent).

Nach analoger Rechnung wie oben ergibt sich für den aus den Klemmen der Stromquelle herausfließenden (und damit den Lastwiderstand durchströmenden) Strom I :

$$I = I_q \cdot \frac{R_i}{R_a + R_i} \quad (\text{Stromteilerregel}).$$

Beachte: Stromquellen können nur bei endlichem Innenwiderstand ($R_i \neq 0$ oder $R_i \neq \infty$) in Spannungsquellen umgewandelt werden und umgekehrt!

Allgemeines Vorgehen zur Bestimmung der Kenngrößen des Ersatzschaltbildes

1. Quellenspannung U_q ermitteln:

Die Quellenspannung ist die bei Leerlauf an den Klemmen anliegende Spannung U_1 , da ohne Strom auch keine Spannung am Innenwiderstand abfallen kann! Sie lässt sich stets nur näherungsweise mit einem hochwertigen Voltmeter messen, da jedes Voltmeter einen Innenwiderstand besitzt, der nicht Unendlich ist.

2. Quellenstrom I_q ermitteln:

Der Quellenstrom entspricht dem bei Kurzschluss der Quelle in der Kurzschlussstrecke fließendem Strom. Er lässt sich ebenfalls nur näherungsweise mit einem hochwertigen Amperemeter messen, da jedes Amperemeter einen Innenwiderstand besitzt, der nicht Null ist.

3. Innenwiderstand R_i ermitteln:

Er bestimmt sich aus dem Verhältnis von Leerlaufspannung zu Kurzschlussstrom. Messtechnisch lässt er sich durch eine Strom-Spannungs-Messung bei definierter Belastung ermitteln, wenn zuvor z.B. U_q bestimmt wurde.

Sind diese Kenngrößen ermittelt (theoretisch oder auch experimentell), dann ist natürlich auch die Transformation der Span-

nungsquelle in die äquivalente Stromquelle nach oben angegebener Vorschrift (Bild 1) ohne weiteres möglich, um ggf. eine Vereinfachung der weiteren Berechnung zu erzielen.

In der Regel interessieren nämlich die sich einstellenden Werte für die Klemmenspannung und den Klemmenstrom (Arbeitspunkt) an den Zweipolanschlüssen, wenn die Quelle mit einem Verbraucher belastet wird. Letzterer kann wiederum ein elektrisches Netzwerk sein, das meist nur passive Komponenten enthält. Diese wiederum sind mit bekannten Umrechnungsmethoden (Parallel-, Reihen-, Stern-Dreieck-Umrechnung, Kennlinienscherung etc.) zu einem passiven Ersatzzweipol zusammenzufassen. Dieser wird im allgemeinen nichtlinear sein und ist deshalb durch seinen arbeitspunktabhängigen absoluten und differentiellen Widerstand (R, r) zu charakterisieren.

Häufig spielen auch Probleme der Leistungsaufteilung auf die Erzeuger- und Verbraucherzweipole eine beachtliche Rolle. Die maximale Leistungsübertragung von einer Quelle an den Verbraucher (Leistungsanpassung) erfolgt im linearen System für den Fall, dass Innenwiderstand der Quelle und Verbraucherwiderstand gleiche Werte annehmen. Im nichtlinearen Fall ergeben sich nicht so einfache Verhältnisse. Ist, wie am Beispiel der Photovoltaik, der Quelleninnenwiderstand nichtlinear, wird in der Regel mit einer linearen Ersatzkennlinie, die U_q und I_q miteinander verbindet, und dem daraus zu interpretierenden linearen Ersatzinnenwiderstand R_i ein gutes Ergebnis erzielt, wenn $R_a \approx R_i$ gewählt wird. Für die Solarzelle gilt außerdem, dass bei maximaler Leistungsabgabe $r_i = R_{iers}$ ist.

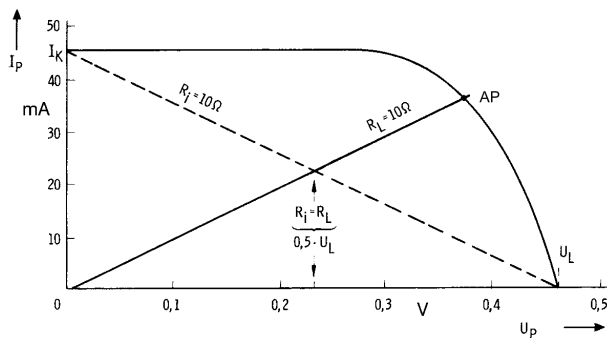


Bild 2 I, U -Kennlinie einer Solarzelle und das Problem der Leistungsanpassung im nichtlinearen Grundstromkreis

Vorbereitungsaufgaben

1. Wiederholen Sie die entsprechenden Kapitel aus der Vorlesung, insbesondere Spannungs- und Stromquellenersatzschaltungen sowie die grafische Lösung des Grundstromkreisproblems.
2. Weisen Sie durch Rechnung nach, dass die maximale Verlustleistung von jeweils 2 W an den Lastwiderständen in Aufgabe 2.1.a, insbesondere für die verwendeten Widerstandskombination $5,1 \Omega \parallel 10 \Omega$ als Belastungswiderstand, nicht überschritten wird! Welche maximale Spannung könnte angelegt werden bzw. welcher maximale Strom dürfte fließen?
3. Weisen Sie durch Rechnung nach, dass im linearen Grundstromkreis die maximale Leistung am Verbraucher auftritt, wenn der Wert des Außenwiderstands gleich dem des Innenwiderstands ist (Leistungsanpassung)!
4. Vertiefen Sie durch Literaturstudium Ihre Kenntnisse über Solarzellen (z.B. *Nührmann: Das große Werkbuch Elektronik, Bd. 1, S. 1145-1150*)!
5. Überlegen Sie sich unter Bezugnahme auf Bild 2, welches prinzipielle Verhalten der differentielle Innenwiderstand einer Fotozelle in Abhängigkeit von der Klemmenspannung aufweist (qualitative Skizze dazu)!
6. Stellen Sie eine Formel zur Ermittlung der abgegebenen Leistung einer Quelle auf, die nur die Kennwerte U_q, R_i und R_a enthält!

Literatur

- | | |
|-------------------------|---|
| <i>Ose</i> | Elektrotechnik für Ingenieure 2. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig, 2001 |
| <i>Altmann/Schlayer</i> | Lehr- und Übungsbuch Elektrotechnik 2. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig, 2001 |
| <i>Nührmann</i> | Das große Werkbuch Elektronik, Bd. 1, S. 1145-1150 6. Auflage, Franzis 1994 |

2. Versuchsaufgaben und Auswertung

verwendete Geräte: DC-Constanter (variabel), Monozelle, Ein-Taster, Lampe La. **6V/3W**, Solarzelle **BPY 47**, Potentiometer $220\ \Omega$, 2 x Digitalmultimeter MX 54c, Widerstandsdekade, diverse Widerstände, Messleitungen

2.1 IU-Kennlinien von Quellen

Bauen Sie die Schaltung von Bild 3 auf.

- a) **Monozelle:** Verwenden Sie zunächst die an Ihrem Versuchsplatz vorhandene Monozelle (R6-Batterie) als Quelle und messen Sie eine Reihe von Strom-Spannungs-Paaren für verschiedene Werte von R_a . Betreiben Sie das Amperemeter im **10 A-Messbereich** und das Voltmeter im **50 V-Bereich** (Range-Taste!). Tragen Sie die erhaltenen Werte in ein Diagramm ein, dessen Achsskalierung Sie so wählen, dass die Quelleneigenschaften (Neigung der Kennlinie) gut erkennbar sind.

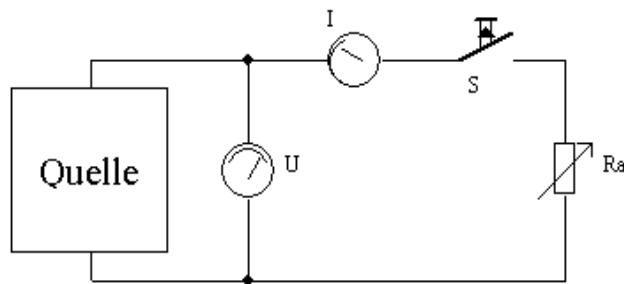


Bild 3 Schaltung zum Ausmessen der IU-Kennlinie von Quellen

Hinweis: Schalten Sie in Reihe zum Amperemeter einen Ein-Taster S , um die Strombelastung der Quelle auf die unmittelbare Messzeit zu beschränken. Den Außenwiderstand R_a realisieren Sie mit den vorhandenen Festwiderständen $5,1\ \Omega$ ($10\ \Omega$ Widerstandskombination!), $5,1\ \Omega$, $10\ \Omega$, $47\ \Omega$, $100\ \Omega$, $470\ \Omega$ sowie durch Realisierung des Leerlauf-Falls. Es ist von besonderer Wichtigkeit, dass Sie die Messungen mit dem niedrigsten Außenwiderstandswert beginnen und den Taster so kurzzeitig als möglich nur unmittelbar für die Messung betätigen!

- Beurteilen Sie die IU-Kennlinie, korrigieren Sie ggf. Einen vorhandenen systematischen Fehler in Ihren Messwerten und bestimmen Sie aus dem Kennlinienverlauf den absoluten und differentiellen Quellen-Innenwiderstand R_i bzw. r_i .
 - Warum lassen sich I_q und U_q direkt messtechnisch nicht erfassen?
 - Charakterisieren und begründen Sie den Typ der verwendeten Messschaltung!
- b) **Solarzelle:** Benutzen Sie nun als Quelle die Solarzelle. Erzeugen Sie die erforderliche Beleuchtungsstärke durch eine 6 V-Glühlampe, die Sie auf Ihrem Schaltbrett in engstmöglicher Nachbarschaft zur Solarzelle positionieren. (Speisen Sie diese mit dem DC-(Festspannung-)Netzteil aus dem +5 V/3 A Ausgang.) Ermitteln Sie auch in diesem Fall die Kennlinie des aktiven Zweipols durch Variation des Lastwiderstands (**empfohlen:** $220\ \Omega$ -Potentiometer zur Realisierung verschiedener Belastungsfälle, außerdem den $470\ \Omega$ -Festwiderstand sowie offene Klemmen (Leerlaufsituation)). Bemühen Sie sich, im Einstellbereich des Potis bis ca. 7 mA den Strom in **Stufen von ca. 0,5 mA** bzw. die **Spannung in 0,1 V-Schritten** zu verändern!

Die Digitalmultimeter betreiben Sie jetzt im 5 V- bzw. 500 mA-Messbereich (Auto-Range abschalten)!

Tragen Sie bereits während der Messwertaufnahme die Messergebnisse in einem Diagramm ein, um sicher zu gehen, dass die Kennlinie in ihrem gesamten Verlauf gut mit Messpunkten abgestützt wurde. Darüber hinaus halten Sie alle Messwerte in einer Tabelle fest.

- Zeichnen Sie in das IU-Diagramm $I = f_1(U)$ die Funktionen $r_i = f_2(U)$ und $P = f_3(U)$ mit ein!
- Ermitteln Sie weiterhin die zum Leistungsmaximum gehörige Spannung. Wie groß ist dort r_i ? Vergleichen Sie diesen Werte mit dem linearen Ersatzwiderstand der Solarzelle $R_{i,ers}$. Zeichnen Sie die zum so bestimmten leistungsmäßig optimalen Arbeitspunkt gehörige Lastkennlinie in das Diagramm ein und bestimmen Sie daraus den erforderlichen $R_{i,opt}$ (optimaler Lastwiderstand). Diskutieren Sie die Ergebnisse unter Berücksichtigung der zu Bild 2 getroffenen Aussagen!

2.2 Der lineare Grundstromkreis- Arbeitspunkt und Leistungsabgabe

Schalten Sie nun in Reihe zu der im vorigen Versuchsteil untersuchten Monozelle einen Widerstand $R = 1\ \text{k}\Omega$, um sich damit

eine neue **Spannungsquelle** mit dem Innenwiderstand $R_i \approx 1 \text{ k}\Omega$ zu realisieren.

Beschalten sie diesen aktiven Zweipol mit der am Versuchsplatz befindlichen **Widerstandsdekade** und messen Sie mit den Digitalmultimetern die sich an ihm einstellenden Strom- und Spannungswerte für unterschiedliche Widerstandswerte im Bereich zwischen Leerlauf- und Kurzschlussfall (Bild 3).

Die Digitalmultimeter betreiben Sie auch hier wieder im 5 V- bzw. 50 mA-Messbereich!

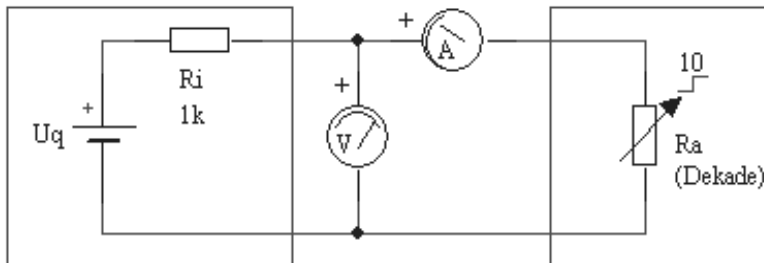


Bild 3
Messschaltung zum Grundstromkreis

| R_a | U/V | I/mA | P_{exp}/mW | P_{theor}/mW |
|---------------------|-------|--------|--------------|----------------|
| 0 (Kurzschluss) | | | | |
| 90 Ω | | | | |
| 100 Ω | | | | |
| 200 Ω | | | | |
| 300 Ω | | | | |
| 500 Ω | | | | |
| 700 Ω | | | | |
| 1 $k\Omega$ | | | | |
| 1,5 $k\Omega$ | | | | |
| 2 $k\Omega$ | | | | |
| 3 $k\Omega$ | | | | |
| 5 $k\Omega$ | | | | |
| 10 $k\Omega$ | | | | |
| 20 $k\Omega$ | | | | |
| ∞ (Leerlauf) | | | | |

- Stellen Sie die vom aktiven Zweipol abgegebene Leistung in einem $P = f(U)$ Diagramm dar und vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit der in das gleiche Diagramm einzutragenden theoretischen Leistungsabgabe, die Sie mit einer Formel ermitteln, die nur die im Messaufbau verwendeten Kenngrößen enthält. Diskutieren Sie kritisch den gemessenen Verlauf bzw. Abweichungen von der Theorie! Weisen Sie nach, dass das Leistungsmaximum den Fall der Leistungsanpassung kennzeichnet.
- Begründen Sie den gewählten Typ Messschaltung!
- Konstruieren Sie in einem IU -Diagramm (**Millimeterpapier**) für den Lastwiderstandswert 2 $k\Omega$ den theoretischen Arbeitspunkt unter Verwendung der verwendeten Schaltungsparameter (Sollwerte) und vergleichen Sie das Ergebnis mit den Messwerten für Strom und Spannung in diesem Fall. Diskutieren Sie Abweichungen!