

GRUNDLAGENLABOR

CLASSIC

LINEARE QUELLEN ERSATZSCHALTUNGEN UND KENNLINIEN

Inhalt:

1. Einleitung und Zielsetzung.....	2
2. Theoretische Aufgaben - Vorbereitung.....	2
3. Praktische Messaufgaben	3
Anhang: Theorie Quellen, Ersatzschaltungen und Kennlinien	5

Filename: Lineare_Quellen_2_0.doc	Version: 2.0	Author: S. Wicki
Created: 05.11.2002	Last modified: 27.07.2009 22:20	Page: 1 / 11

1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Jedes beliebige *lineare* Netzwerk, welches aus Widerständen, Spannungs- und Stromquellen (auch aus Kapazitäten und Induktivitäten) besteht, kann durch *eine* Ersatzschaltung mit einer Strom- oder Spannungsquelle und einem Widerstand (Impedanz) dargestellt werden. Dabei verhält sich das Netzwerk von aussen genau gleich wie die entsprechende Ersatzschaltung.

Solche Ersatzschaltungen sind wichtig für den Entwurf und die Analyse von elektronischen Schaltungen. Mit Hilfe dieser Ersatzschaltungen können auf einfache Weise Quellenwiderstände, Zeitkonstanten und Grenzfrequenzen berechnet werden.

Dieser Versuch hat folgende Zielsetzungen:

- Anwenden der Norton und Thevenin Ersatzschaltung
- Anwenden von Strom- und Spannungsfehlerschaltung
- Messen und Auswerten von Kennlinien
- Kennenlernen von Arbeitsgeraden
- Unterschied zwischen Strom- und Spannungsquelle lernen

2. THEORETISCHE AUFGABEN - VORBEREITUNG

2.1 Theoretische Grundlagen

Studieren Sie die Theoretischen Grundlagen im Anhang und lösen Sie Aufgaben dazu (Kap.2.2).

2.2 Aufgaben

- a) Von einer linearen Quelle werden zwei Messpunkte (U_1, I_1) , (U_2, I_2) gemessen:
 - Berechnen Sie allgemein den Innenwiderstand dieser Quelle.
 - Berechnen Sie allgemein die Leerlaufspannung für die Thevenin Ersatzschaltung.
 - Berechnen Sie allgemein den Kurzschlussstrom für die Norton Ersatzschaltung.
 - Skizzieren Sie beide Schaltungen.
- b) Welche Darstellungsart der Quelle (Thevenin oder Norton) ist für die Figur A-12, welche für die Figur A-13 die geeignete?
- c) Wie sehen die Kennlinien aus für
 - $U_q = \text{variabel}$, $R_q = \text{konstant}$ (Thevenin Schaltung)
 - $I_q = \text{variabel}$, $R_q = \text{konstant}$ (Norton Schaltung)?

3. PRAKTISCHE MESSAUFGABEN

3.1 Ersatzschaltbilder

Bauen Sie ein lineares 1-Tor gemäss Fig. 3-1 auf. Überlegen Sie sich sinnvolle Werte für die Widerstände R_1 und R_2 .

Vergleichen Sie alle Messungen mit Berechnungen.

- Messen Sie die Quellenspannung vom Netzgerät.
- Messen Sie die Leerlaufspannung vom 1-Tor.
- Messen Sie den Kurzschlussstrom vom 1-Tor.
- Bestimmen Sie den Innenwiderstand vom 1-Tor.
- Bestimmen Sie die Thevenin Ersatzschaltung vom 1-Tor (U_q' und R_q' , Fig. 3-2)
- Bilden Sie die Thevenin Ersatzschaltung mit (U_q' und R_q' , Fig. 3-2) nach und überprüfen Sie die Nachbildung durch Wiederholung der Messungen a), b) und c).

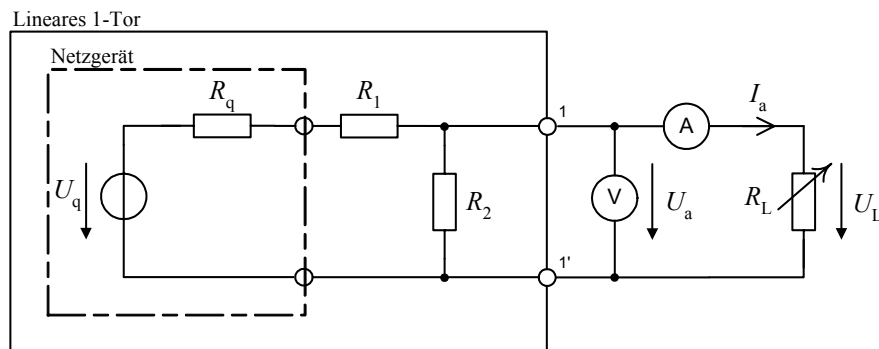


Fig. 3-1 lineares 1-Tor

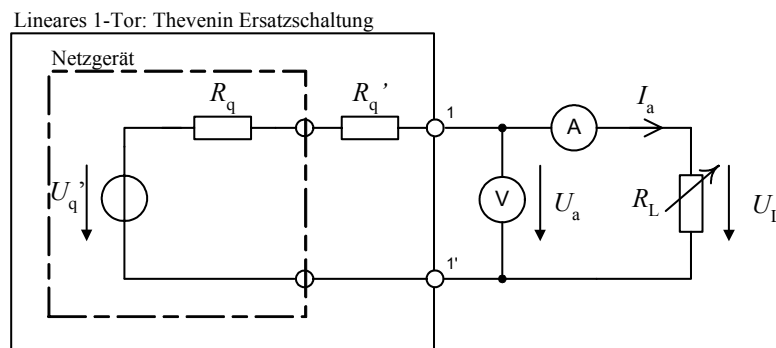


Fig. 3-2 lineares 1-Tor: Thevenin Ersatzschaltung

3.2 Einfache Stromquelle

Eine reale Stromquelle zeichnet sich dadurch aus, dass sie in einem grossen Lastbereich einen sehr konstanten Strom liefert. Transistoren eignen sich sehr gut als Stromquellen und werden häufig dazu eingesetzt (Konstantstromquelle, Stromspiegel).

Wir wollen eine einfache Stromquelle selber aufbauen, indem wir das Labornetzgerät verwenden, und einen Widerstand $R_i=100\text{ k}\Omega$ in Serie schalten (Fig. 3-3).

- Messen Sie die U/I-Kennlinie der realen Stromquelle aus. Zeichnen Sie die Kennlinie in ein Diagramm $U_a = f(I_a)$.
- In welchem Bereich des Lastwiderstandes genügt die Stromquelle Ihren Ansprüchen?

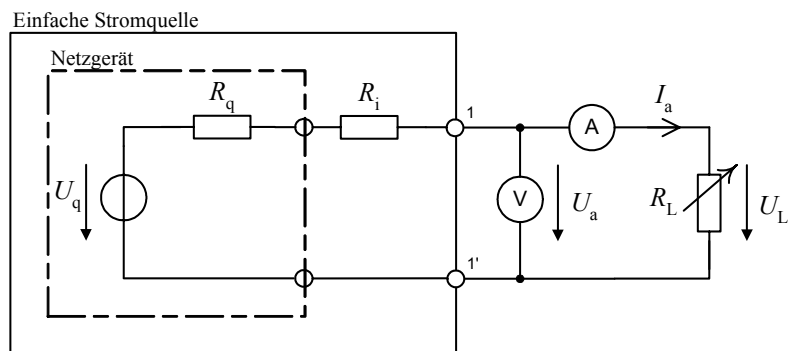
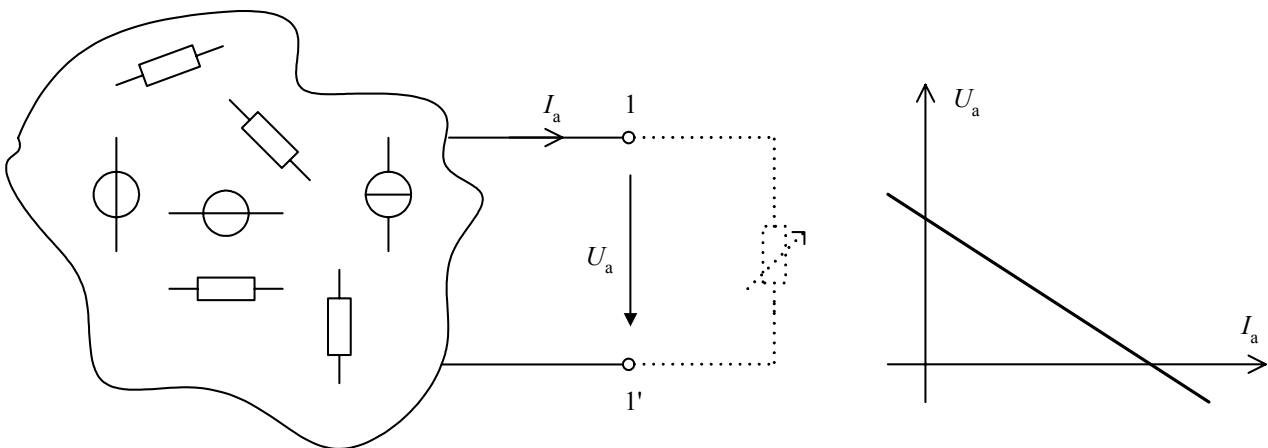


Fig. 3-3 Einfache Stromquelle

ANHANG: THEORIE QUELLEN, ERSATZSCHALTUNGEN UND KENNLINIEN¹

Man betrachte ein beliebiges lineares Netzwerk, das aus Widerständen, Spannungs- und Stromquellen besteht (in der Wechselstromtechnik: RLCM-Netzwerk mit Quellen). Nun wird das Netzwerk an **zwei Klemmen** 1 und 1' zugänglich gemacht (Interaktion mit der „Aussenwelt“). Belastet man jetzt das Netzwerk, so sind U_a und I_a **linear** voneinander abhängig (Gerade in U - I -Kennlinie).



Figur A-1: Beliebiges lineares Netzwerk mit zwei Klemmen (1-Tor) und U - I -Kennlinie

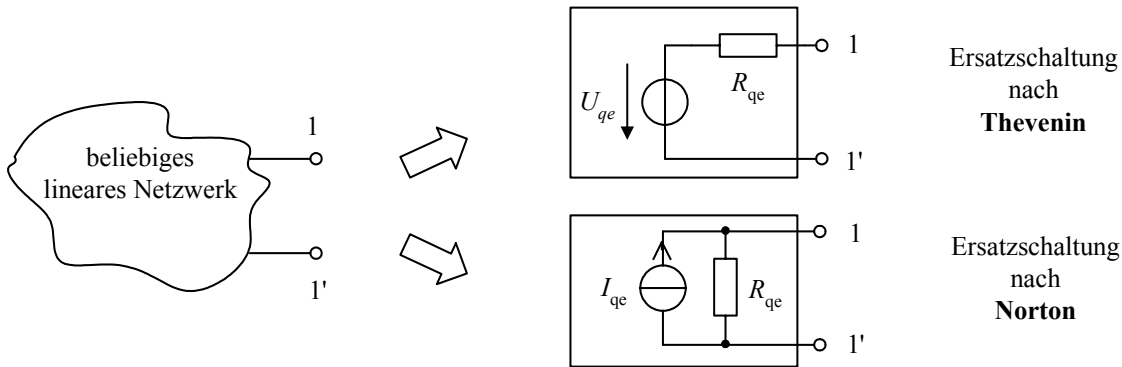
Die lineare Abhängigkeit zwischen U_a und I_a kann z.B. in der Form $U_a = \alpha \cdot I_a + \beta$ geschrieben werden (Geradengleichung). Die beiden Grössen α und β (Parameter) hängen nicht von der Belastung ab, (sondern) sie sind für ein gegebenes Netzwerk feste Werte (reelle oder komplexe Zahlenwerte).

Das beliebige Netzwerk soll jetzt in seinem Innern durch ein möglichst einfaches Ersatznetzwerk ersetzt werden, so dass die Wirkung nach aussen an den Klemmen 1 und 1' unverändert bleibt. Ein äusserer Beobachter kann also nicht feststellen (mit beliebigen Experimenten an den Klemmen 1-1'), dass im Innern das (komplizierte) Netzwerk durch ein (einfaches) Ersatznetzwerk ausgetauscht wurde.

Die einfachsten zwei Ersatznetzwerke sind eine **ideale Spannungsquelle mit Seriewiderstand** oder eine **ideale Stromquelle mit Parallelwiderstand**. Figur A-2 zeigt diese zwei Ersatznetzwerke für ein beliebiges lineares Netzwerk. An dieser Stelle sei noch einmal deutlich festgehalten: **Der Ersatz geschieht bezüglich zweier wohldefinierter Klemmen; das Innenleben wird durch das Ersatznetzwerk nicht nachgebildet.** In Figur A-2 sind absichtlich noch Umrandungen um die Ersatzquellen gezeichnet; damit wird visualisiert, dass das Ersatznetzwerk **nach aussen** die gleiche Wirkung wie das Originalnetzwerk aufweist.

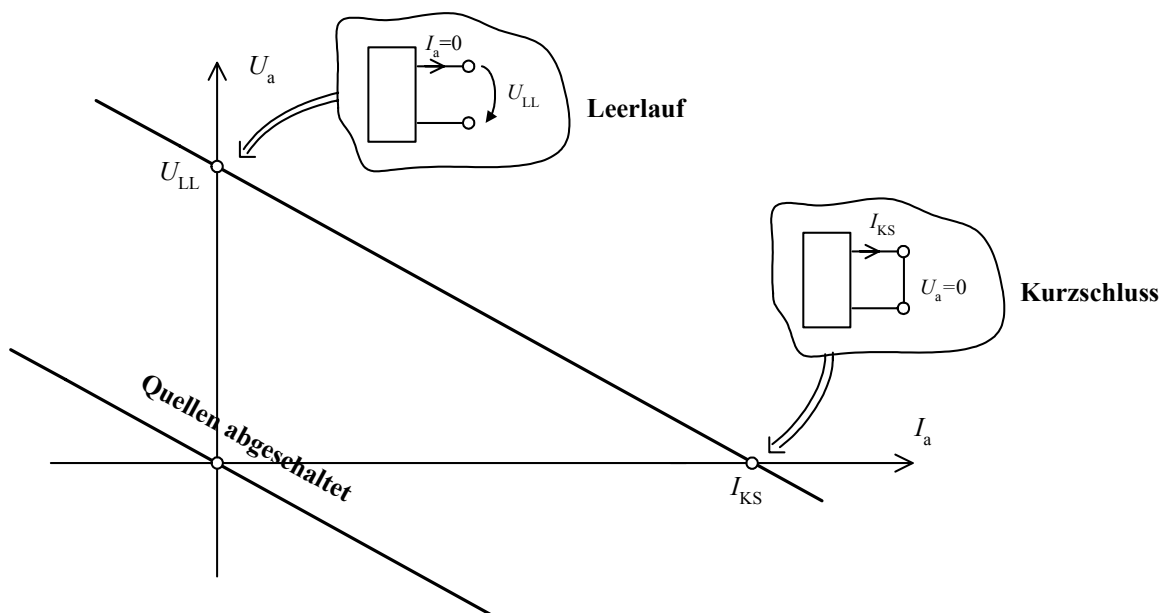
¹ Quelle: Skript Allgemeine Elektrotechnik, Version 23.06.2005, Peter Niklaus, FHNW

Da diese beiden Ersatzschaltung sehr wichtig sind, erhalten sie eigene Namen: Die Spannungsquelle mit Seriewiderstand bezeichnet man als *Thevenin'sche Ersatzschaltung*. Der Ersatz mit der idealen Stromquelle und dem Parallelwiderstand heisst *Norton'sche Ersatzschaltung*. Beide Ersatzschaltungen sind mit zwei Grössen vollständig (notwendig und hinreichend) beschrieben und daher lässt sich auch gerade die U_a/I_a -Gerade (Figur A-1) nachbilden. Die zwei Grössen (U_{qe} und R_{qe} oder I_{qe} und R_{qe}) der Ersatzschaltung(en) sind nun mit geeigneten Überlegungen und Experimenten an den Klemmen 1-1' zu bestimmen.



Figur A-2: Die zwei einfachsten Ersatznetzwerke für ein lineares Netzwerk bezüglich der Klemmen 1-1': Thevenin-Ersatzschaltung und Norton-Ersatzschaltung

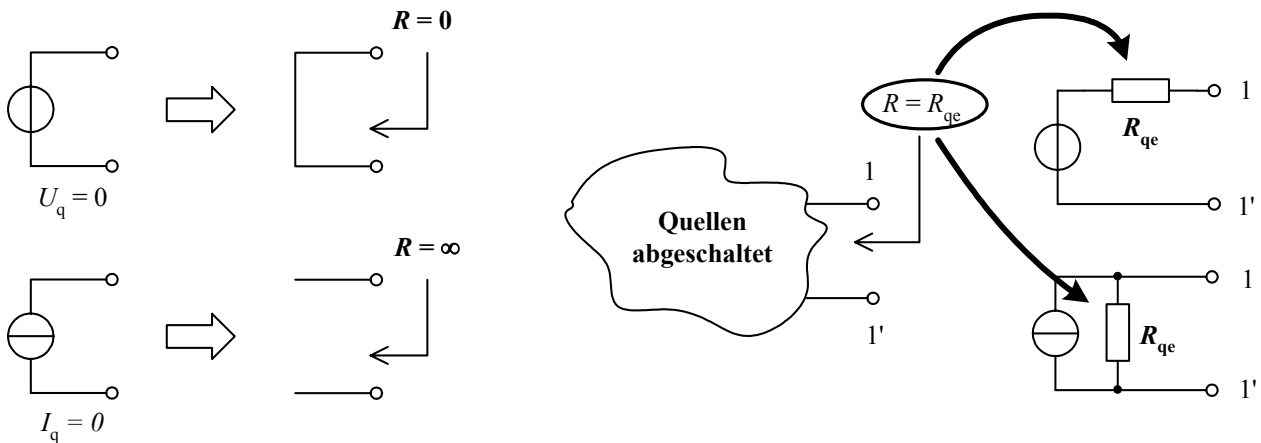
Zwei beliebige (unterschiedliche) Punkte auf der U_a - I_a -Geraden genügen (Figur A-1), um die Ersatzschaltung nach Thevenin oder Norton vollständig zu beschreiben. Lässt man die Klemmen 1-1' offen (Leerlauf), so misst man an ihnen die sog. **Leerlaufspannung** U_{LL} , schliesst man die Klemmen kurz, so fliesst der sog. **Kurzschlussstrom** I_{KS} . In Figur A-3 sind beide „extremen“ Betriebszustände eingetragen. Schaltet man alle inneren Quellen ab („Quellen werden zu Null gemacht“), so wird das Netzwerk passiv, d.h. seine Kennlinie verläuft nun durch den Nullpunkt.



Figur A-3: Leerlaufspannung, Kurzschlussstrom („extreme“ Betriebszustände) und abgeschaltete Quellen

Abschalten einer Quelle heisst, sie durch ihren **Innenwiderstand** ersetzen. Bei der idealen Spannungsquelle ist der Innenwiderstand Null ($U_q = 0$). Für die ideale Stromquelle ist der Innenwiderstand Unendlich ($I_q = 0$). Figur A-4 zeigt das „Abschalten“ von Quellen.

Die U_a - I_a -Kennlinie des passiven Netzwerkes durch den Nullpunkt entspricht der Kennlinie eines ohmschen Widerstandes (Figur A-3). Dieser ohmsche Widerstand ist der **Ersatzwiderstand**, wenn bei **abgeschalteten Quellen** bei den Klemmen 1-1' in das Netzwerk hineingemessen wird („hineingeschaut wird“). Dieser „gesehene“ oder gemessene Widerstand wird dann gerade zum Widerstand R_e der Ersatzschaltung nach Thevenin oder Norton (Figur A-5).



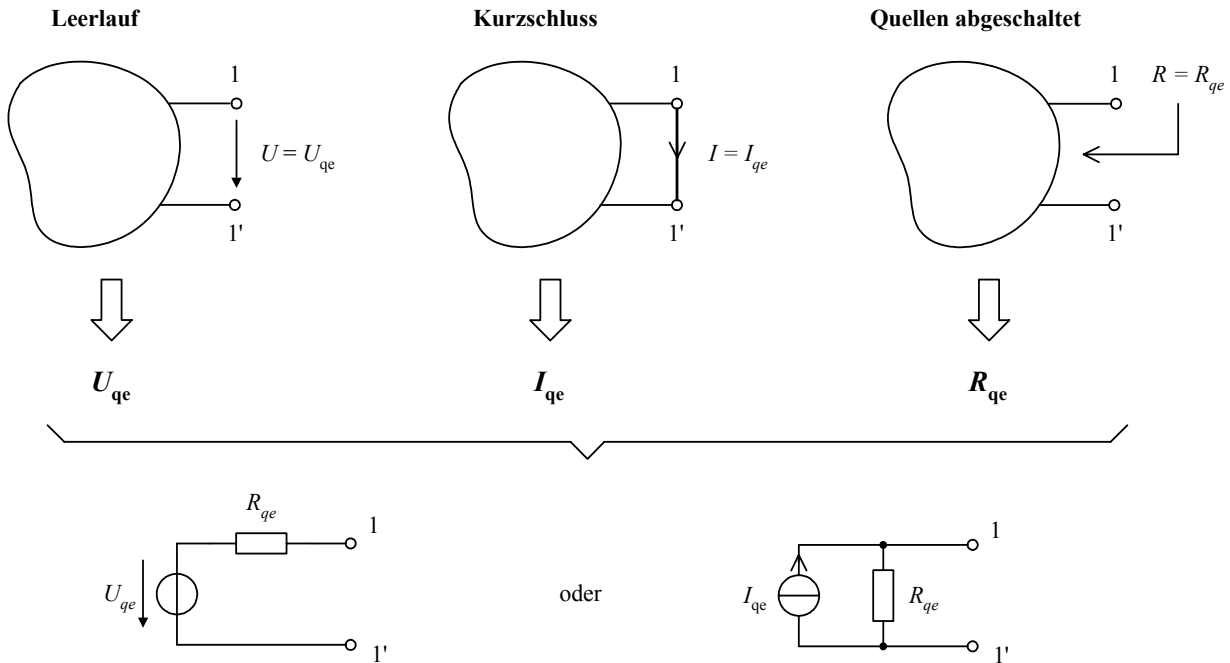
Figur A-4: Abschalten von Quellen, d.h. Ersatz der Quellen mit Innenwiderstand **Figur A-5:** Ersatzwiderstand bei abgeschalteten Quellen

Beim Abschalten einer Quelle wird sie nicht einfach weggelassen, sondern durch ihren Innenwiderstand ersetzt. Figur A-4 in Worten ausgedrückt:

Beim Abschalten einer Quelle wird

- die ideale Spannungsquelle durch einen Kurzschluss ersetzt
- die ideale Stromquelle durch einen Unterbruch ersetzt.

Damit stehen nun drei „Experimente“ zur Verfügung, um die zwei Grössen (U_{qe} und R_{qe} oder I_{qe} und R_{qe}) der Ersatzschaltung(en) zu bestimmen. Figur A-6 zeigt die Methoden in einer Übersicht.



Figur A-6: Bestimmen der Ersatzschaltung(en) eines linearen Netzwerkes

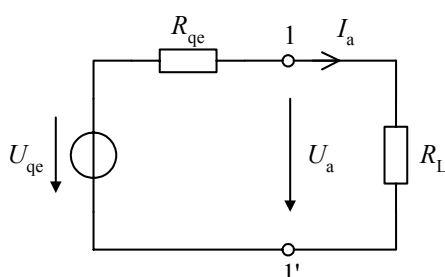
Von obigen drei „Experimenten“ genügen zwei um die Ersatzschaltungen zu bestimmen. Die drei Größen U_{qe} , I_{qe} und R_{qe} sind voneinander abhängig (zur Beschreibung einer Geraden genügen zwei Größen). Aus Figur A-3 ist leicht ersichtlich:

$$U_{qe} = I_{qe} \cdot R_{qe} \quad (1)$$

Meistens ist die Bestimmung des Ersatzwiderstandes die einfachste der drei Untersuchungen, so dass, je nach Struktur des Netzwerkes, zusätzlich noch die Leerlaufspannung oder der Kurzschlussstrom zu bestimmen ist.

Die beiden Ersatzschaltungen nach Thevenin und Norton sind vollständig gleichwertig, d.h. die Wahl der Ersatzschaltung ist frei und mit (1) kann eine Thevenin-Ersatzschaltung in eine Norton-Ersatzschaltung umgewandelt werden und umgekehrt.

Belastet man eine Quelle (Ersatzschaltung eines linearen Netzwerkes) mit einem (variablen) Lastwiderstand, so werden folgende Bezeichnungen eingeführt:



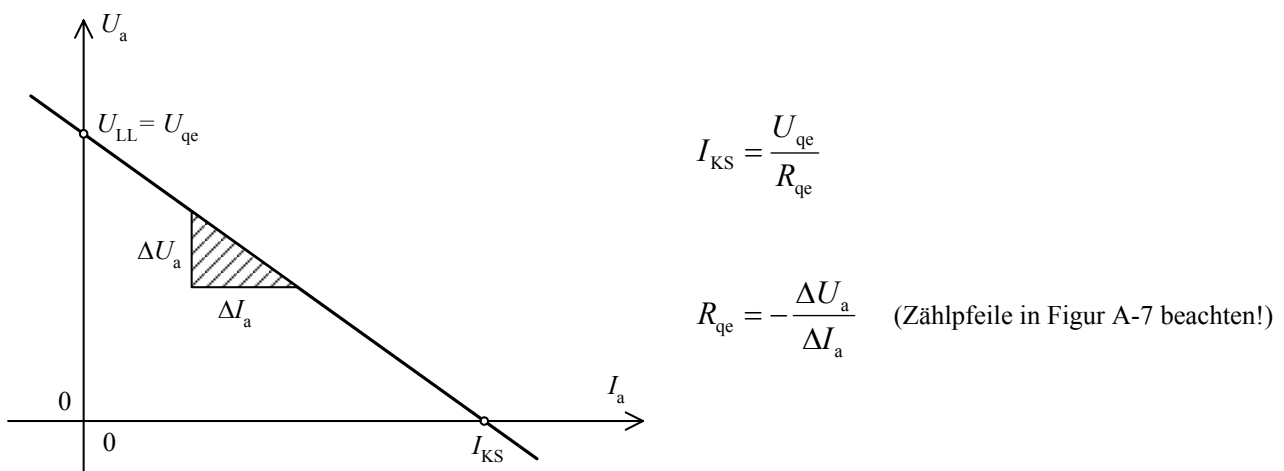
- U_{qe} : Leerlaufspannung
- R_{qe} : Innenwiderstand (Ersatzwiderstand)
- R_L : Lastwiderstand
- U_a : Klemmenspannung
- I_a : Klemmenstrom

Figur A-7: Belastete Quelle und Begriffe

Fasst man I_a als unabhängige und U_a als abhängige Variable auf, so bezeichnet man die Funktion $U_a = f(I_a)$ und ihre graphische Darstellung als Quellenkennlinie (QKL). Für die QKL ergibt sich (Figur A-7):

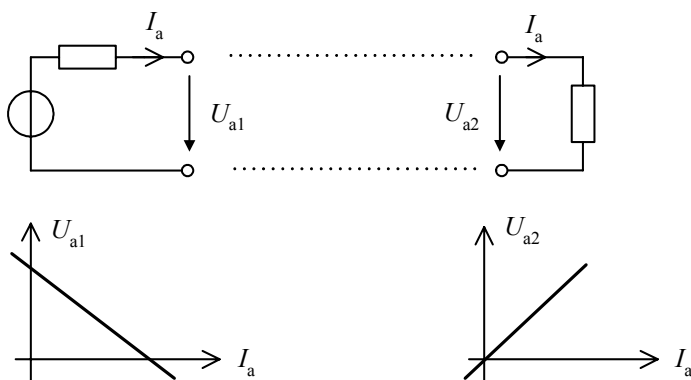
$$U_a = U_{qe} - I_a \cdot R_{qe} \quad (2)$$

Die graphische Darstellung von (2) ist eine Gerade, die Schnittpunkte mit den Koordinatenachsen erhält man mit $I_a = 0$ (Leerlauf) und $U_a = 0$ (Kurzschluss). Figur A-8 zeigt diese QKL mit den „extremen Betriebszuständen“ Leerlauf und Kurzschluss.



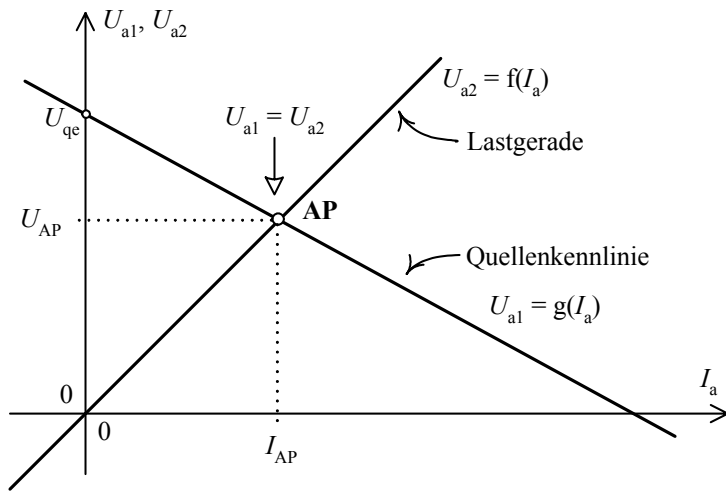
Figur A-8: Quellenkennlinie QKL mit Leerlaufpunkt und Kurzschlusspunkt

Führt man für Quelle und Lastwiderstand je eine Kennlinie ein wie in Figur A-9, so werden beim Zusammenschalten von Quelle und Lastwiderstand die beiden Kennlinien in ein gemeinsames Koordinatensystem gezeichnet (Strom I_a durch Quelle und Last ist identisch). Den Schnittpunkt der beiden Kennlinien bezeichnet man als **Arbeitspunkt (AP)**. Dieser Arbeitspunkt stellt sich dort ein, wo $U_{a1} = U_{a2}$ wird (Figur A-10).



Man beachte, dass in Figur A-9 die Quelle im EZS und der Lastwiderstand im VZS befeilt sind. Die Quellenkennlinie weist daher eine negative Steigung auf, obwohl ihr Innenwiderstand positiv ist

Figur A-9: Separate Kennlinien für Quelle und Lastwiderstand (Lastgerade)



$$U_{a1} = U_{qe} - R_{qe} \cdot I_a$$

$$U_{a2} = R_L \cdot I_a$$

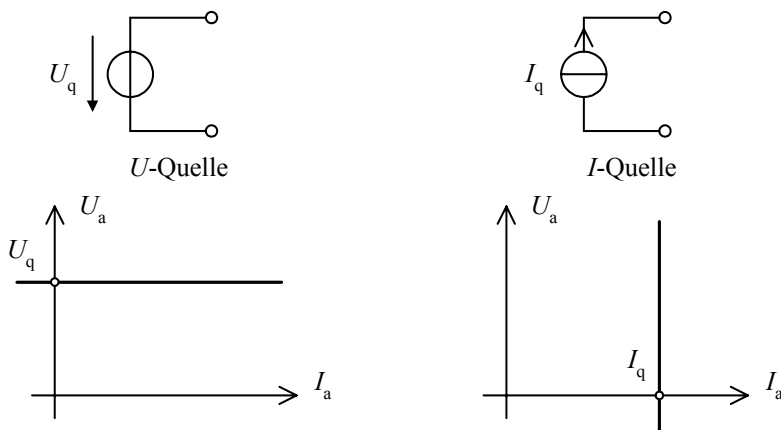
Figur A-10: Quellenkennlinie mit Lastgeraden und Arbeitspunkt

Gleichsetzen von U_{a1} und U_{a2} liefert Strom (I_{AP}) und Spannung (U_{AP}) im Arbeitspunkt:

$$I_{AP} = \frac{U_{qe}}{R_{qe} + R_L} \quad U_{AP} = \frac{U_{qe} \cdot R_L}{R_{qe} + R_L} \quad (3)$$

Beide Formeln können auch direkt in der Figur A-7 „abgelesen werden“. Das Schneiden der Kennlinien, um den Arbeitspunkt zu bestimmen, macht besonders bei nichtlinearen Kennlinien Sinn (häufig die einzige Lösungsmöglichkeit). Im Fall von linearen Kennlinien trägt die Graphik zur Veranschaulichung bei.

Um sich etwas an die Darstellung mit der Quellenkennlinie zu gewöhnen, werden jetzt einige Beispiele von idealen und realen Quellen betrachtet. Figur A-11 zeigt den Vergleich von idealer Spannungs- und Stromquelle.

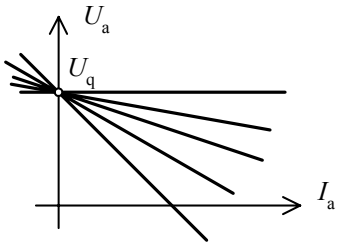


Beachte:

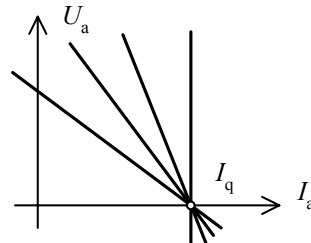
Diese idealen Quellen können nicht ineinander umgewandelt werden. D.h. eine ideale U -Quelle muss immer mit der Thevenin-Ersatzschaltung dargestellt werden. Eine ideale I -Quelle benötigt die Norton-Ersatzschaltung.

Figur A-11: Ideale Spannungsquelle (U -Quelle) und ideale Stromquelle (I -Quelle) mit Kennlinien

Figur A-12 zeigt eine Quelle mit konstanter Leerlaufspannung und variablem Innenwiderstand. Eine Quelle mit konstantem Kurzschlussstrom und variablem Innenwiderstand ist in Figur A-13 dargestellt.



Figur A-12: Quelle mit $U_q =$ konstant und $R_q =$ variabel



Figur A-13: Quelle mit $I_q =$ konstant und $R_q =$ variabel