

Springer-Lehrbuch

Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik 1

Gleichstromnetzwerke und ihre Anwendungen

von
Steffen Paul, Reinhold Paul

5. aktualisierte Auflage

Springer Vieweg Wiesbaden 2014

Verlag C.H. Beck im Internet:
www.beck.de
ISBN 978 3 642 53947 3

Zu [Inhaltsverzeichnis](#)

schnell und portofrei erhältlich bei beck-shop.de DIE FACHBUCHHANDLUNG

Lernziel

Nach Durcharbeit dieses Kapitels sollte der Leser kennen

- die Begriffe Strom, Quellenspannung und Stromkreis,
- das ohmsche Gesetz und die Definition des Ohmschen Widerstandes,
- den Zweipolbegriff,
- die Kirchhoffschen Gesetze und ihre Anwendung auf einfache Stromkreise,
- den Grundstromkreis und seine Merkmale,
- das Prinzip der Strom- und Spannungsmessung,
- die Zweipoltheorie und ihre Anwendung auf einfache Stromkreise,
- den Grundstromkreis mit nichtlinearen Elementen,
- den Umgang mit gesteuerten Quellen,
- das Grundverständnis von Dioden, Transistoren und Operationsverstärkern und ihre Anwendung als Netzwerkelement.

2.1 Modelle elektrischer Stromkreise

Wir wenden die bisherigen Grundbegriffe auf ein Beispiel an: elektromagnetische Strahlung in Form von Sonnenlicht soll elektrisch den Keller eines Gebäudes beleuchten: durch eine Lumineszenzdiode, eine größere LED oder eine Minileuchtstoffröhre. Bei Abschalten muss die LED noch eine Weile nachleuchten.

Diese (primitive) Systemaufgabe (Energiewandlung, elektrische Übertragung, Rückwandlung in nichtelektrische Energie) wird mit *Bauelementen* realisiert: Solarzellen, Verbindungsdrähte, ein Schalter, die Beleuchtungselemente und ein Kondensator zur Energiespeicherung. Die Zweipolelemente bilden einen Stromkreis nach Abb. 2.1. Bei Schließen des Schalters S verstreicht eine Zeit, bis der Kondensator auf die Spannung der Solarzelle

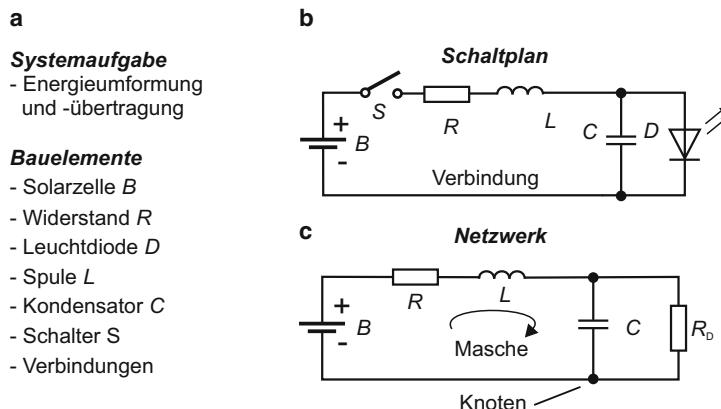


Abb. 2.1 Systemaufgabe gelöst durch eine Schaltung

geladen ist, gleichzeitig beginnt die LED zu leuchten. Nach dem Abschalten verlischt die Diode allmählich. Fehlt der Kondensator, so leuchtet die LED unmittelbar und verlischt sofort mit dem Abschalten.

Grundlagen einer Analyse dieses Netzwerkes sind

- wirklichkeitsnahe *Bauelementemodelle* ersetzt durch *Netzwerkelemente*,
- *Analyseverfahren*, die die Kirchhoff'schen Gleichungen sowie die *Klemmenbeziehungen* der Netzwerkelemente nutzen.

Je nach Komplexität erfolgt die Netzwerkanalyse entweder von Hand, mit Taschenrechner oder PC unter Nutzung von Programmen wie MATLAB, Multisim (Electronics Workbench), PSPICE/SPICE u. a. Der Vergleich der Ergebnisse mit der Messung gibt Aufschluss über die Güte der Netzwerkmodelle. Ihre Schaltungsformen werden als „*Ersatzschaltungen*“ bezeichnet. So besteht die Ersatzschaltung der Solarzelle aus einer Stromquelle mit zugeschalteter (nichtlinearer) Diode, die LED wird als Diode mit einer optischen Quelle für die erzeugte Strahlung modelliert.

Zur Funktion muss die Schaltung bemessen werden: eine LED hat eine Betriebsspannung von 2 V beim Strom von 10 mA (eine große LED der Leistung $P = 3 \text{ W}$ erfordert $I = 1,5 \text{ A}$). Eine Solarzelle liefert die Spannung 0,6 ... 0,7 V, deswegen sind drei in Reihenschaltung erforderlich. Bei einem Solarumsetzungswirkungsgrad von 20 % setzt die Zelle die Solarleistung von etwa 1 kW/m^2 in eine elektrische Leistung von $200 \text{ W/m}^2 = 20 \text{ mW/cm}^2$ um. Eine Solarzelle der Fläche $A > 1 \text{ cm}^2$ reicht zur Versorgung der kleinen LED. Die leistungsstärkere LED erfordert entweder eine Erhöhung der Zellenfläche oder einen Stromverstärker mit der Stromverstärkung $I_a/I_e = 1,5 \text{ A}/10 \text{ mA} = 150$, was immer ein solcher Verstärker im Moment auch sein möge. Soll als Leuchtmittel eine Minileuchtstoffröhre (Leistung ca. 1 W, Betriebsspannung 230 V) dienen, dann müsste ein Spannungsverstärker mit der Spannungsverstärkung $U_a/U_e = 230 \text{ V}/2 \text{ V} = 115$ zwischengeschaltet werden.

Die Anordnung Abb. 2.1 hat mehrere Merkmale: sie

- erfüllt die gestellte *Systemaufgabe*,
- besteht aus *Bauelementen*, die zu einer *Schaltung* mit Stromknoten und Maschen zusammengefügt sind und
- lässt sich verkürzt durch einen *Schaltplan* darstellen, wenn jedem Bauelement ein *Schaltzeichen* zugeordnet wird (Abb. 2.1b).

Das Gesamtverhalten erkennen wir durch *Modellierung*. Dabei wird jedem Bauelement ein *Modell-* oder *Netzwerkelement* zugeordnet (Abb. 2.1c). Es erfasst sein typisches Verhalten frei von „Sekundäreffekten“ (z. B. Verluste durch Widerstände). So geht die Schaltung in eine Zusammenschaltung von Netzwerkelementen, kurz ein *elektrisches Netzwerk* über.

- ▶ Ein Netzwerk ist eine modellhafte (mathematische) Abbildung einer Schaltung. Seine Ströme und Spannungen werden durch die Klemmenbeziehungen der Netzwerkelemente und ihre Zusammenschaltung, die *Topologie* oder *Netzwerkstruktur* bestimmt. Dabei gelten die Kirchhoffschen Gleichungen zu jedem Zeitpunkt.

Die Berechnung der Ströme und Spannungen heißt *Netzwerkanalyse*. Technisch verbinden Leitungen die einzelnen Bauelemente als Verbindungsdrähte, als Leitungen auf einer Leiterplatte oder in einer integrierten Schaltung. Im Netzwerk-/Schaltpunkt werden Leitungsverbindungen als ideal (widerstandslos) angesehen. Zwischen Schaltung und Netzwerk besteht *ein grundsätzlicher Unterschied*: in der Schaltung sind Ströme und Spannungen *messbar*, im zugehörigen Netzwerk können sie *nur berechnet* werden. Deshalb hat die *Netzwerkanalyse fundamentale Bedeutung zur Bemessung einer Schaltung*. Die Modellierung der Netzwerkelemente bestimmt dabei den Analyseaufwand.

Fürs Erste könnte die Diode D in Abb. 2.1b durch einen Widerstand R ersetzt werden, ein sicher ungenaues Modell. Deshalb ist zwischen Modellierungsgenauigkeit und Analyseaufwand abzuwagen. Hier spielen die Netzwerkanalyseprogramme ihre Stärken aus: bei Programmen reicht die Eingabe der Schaltungsstruktur und die Wahl der Netzwerkmodelle zur anschließenden automatischen Netzwerkanalyse. Dieser Vorgang wird als *Schaltungssimulation* bezeichnet und ist heute das Standardverfahren der Netzwerkanalyse.

Das Beispiel spricht bereits die Themenkreise an, die vor einer Netzwerkanalyse stehen und den Inhalt dieses Kapitels bilden

- Strom- oder Spannungsquellen (Abschn. 2.2) als Modelle aktiver Zweipole,
- das Modell des resistiven Zweipols (Abschn. 2.3),
- die Zusammenschaltung von aktivem und passivem Zweipol zum Grundstromkreis (Abschn. 2.4), auch in nichtlinearer Form (Abschn. 2.5),

- einfache „Mehrpole“ mit Ein- und Ausgangsklemmen zwischen Quelle und Verbraucher (Abschn. 2.6). Typische Bauelemente sind Doppelleitungen, Transformatoren, aber auch Verstärkerelemente. Aus Sicht des Netzwerkes bilden sie *gesteuerte Quellen*, praktisch werden sie durch Transistoren und damit aufgebaute Schaltungseinheiten (z. B. *Operationsverstärker* u. a.) realisiert (Abschn. 2.7).

Die Abschn. 2.2, 2.3 und 2.4 sind unverzichtbare Grundlagen für Netzwerke, die Abschn. 2.6 und 2.7 können zunächst zurückgestellt werden. Obwohl nichtlineares Verhalten durch Halbleiterbauelemente schon bei sehr einfachen Beispielen auftritt, entfällt es zu meist im Rahmen der Grundausbildung. Wir beschreiten diesen Weg nicht, sondern betrachten den Themenkreis in Abschn. 2.5.

Kapitel 2 beschränkt sich auf Gleichstromkreise. Da Kondensatoren (ebenso wie Spulen und der Transformator) erst bei zeitveränderlichen Vorgängen wirksam werden, behandeln wir diese Bauelemente später zusammen mit dem elektrischen und magnetischen Feld (s. Bd. 2), denn ihr Merkmal ist *Energiespeicherung*. Die Netzwerkanalyse bei zeitveränderlichen Vorgängen ist Gegenstand von Bd. 3. Dabei nutzen wir die Analysemethoden größerer „Gleichstromnetzwerke“ zusammengestellt in Kap. 3 dieses Bandes.

2.2 Unabhängige Spannungs- und Stromquellen

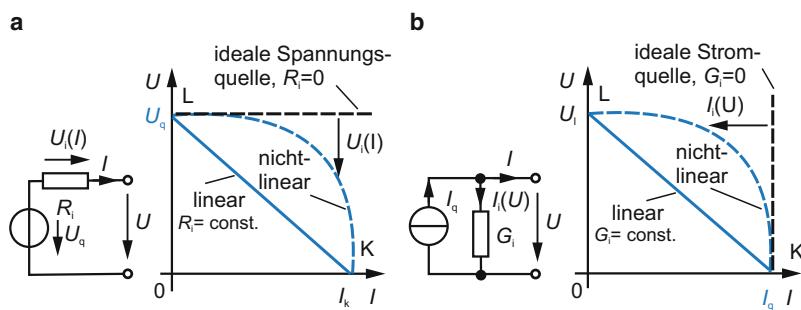
Übersicht. Zweipolbegriff Ein zwischen zwei Knoten liegendes Netzwerk ist bezüglich dieses *Klemmepaars* ein *Zweipol*. Er kann aus einem oder mehreren Netzwerkelementen bestehen: Einzelwiderstand, Zusammenschaltung von Widerständen, Strom- oder Spannungsquellen. Zweipole lassen sich bezüglich des *Energieumsatzes* (Abschn. 1.6.3) unterteilen in

- *aktive Zweipole*, die elektrische Energie *abgeben* (und deshalb wenigstens eine unabhängige Quelle enthalten) und
- *passive Zweipole*, die elektrische Energie *aufnehmen* und in anderer Form (meist Wärme) abgeben. Besser spricht man von einem *Energiewandler*, weil außer Wärme auch eine andere Energieform (z. B. mechanische Energie beim Motor) bereitgestellt werden kann. Der verbreitetste passive Zweipol ist der ohmsche Widerstand oder *resistive Zweipol*.

Weil die Zählrichtungen von Strom und Spannungen am Zweipol unabhängig voneinander gewählt werden können, aber in Beziehung zum Leistungsumsatz stehen, wird der Begriff aktiver-passiver Zweipol gleichwertig durch das *Verbraucher-Erzeuger-Zählpfeilsystem* beschrieben (s. Abschn. 1.6.2). Seine Wirkung im Netzwerk drückt sich als *Klemmen-* oder *U, I*-Verhalten aus. Vorerst betrachten wir Quellen als Grundtyp aktiver Zweipole und den ohmschen Widerstand als *den* passiven Zweipol.

Tab. 2.1 Beispiele zur direkten Erzeugung elektrischer Energie

| Ausgangsenergie | Beispiele | Effekt |
|-----------------|--|---|
| Mechanisch | Elektrischer Generator, van-der-Graff-Generator, Piezogenerator, Dehnungsschwinger | Induktionsgesetz, Reibungselektrizität, piezoelektrischer Effekt |
| Chemisch | Primär-, Sekundärelement, Brennstoffzelle | Elektrochemische Reaktion an Elektroden |
| Strahlung | Solarzelle, Fotozelle, Fotodiode | Fotoeffekt |
| Wärme | Thermoelement, MHD-Generator | Seebeckeffekt, Induktion in Plasmen |
| Elektrisch | Transistoroszillator (Umformung Gleich- in Wechselstrom), Netzgerät (Umformung Wechsel- in Gleichstrom) | Wandlung elektrischer Energie einer Form in eine andere |

**Abb. 2.2** U, I -Kennlinien idealer und nichtidealener Quellen. **a** Spannungsquelle (ideale, nichtlineare und lineare Form). **b** Stromquelle (ideale, nichtlineare und lineare Form). Im nichtlinearen Fall wird der innere Spannungs- bzw. Stromabfall $U_i(I)$, $I_i(U)$ lastabhängig

Quelle Ursache der Ströme in Netzwerken sind *unabhängige* Quellen als

- *Umformerte* nichtelektrischer in elektrische Energie (Tab. 2.1). Dazu zählen vor allem *elektrochemische* Spannungsquellen (Batterie, Akkumulator, Brennstoffzelle), *Strahlungswandler* (Solarzelle, Fotoelement) und *elektromechanische* Spannungsquellen (rotierende Leiterschleifen, Piezogenerator), um die wichtigsten zu nennen.
- Orte, an denen elektrische Energie *einer Form* in eine *andere* umgeformt wird. (Beispiel: Gleichspannung durch Gleichrichtung der Netzspannung, Spannungserzeugung durch das Oszillatorenprinzip. In solchen Fällen spricht man von Umformung.)

Typische Beispiele des U, I -Verhaltens unabhängiger Quellen zeigt Abb. 2.2. Es gibt sie mit

- linearem Klemmenverhalten abhängig von Strom bzw. Spannung, die *linearen Spannungs- oder Stromquellen*,
- nichtlinearem Verhalten: *nichtlineare Spannungs- oder Stromquellen*,

- *begrenzter* Linearität. Die Spannung (bzw. der Strom) ist in einem großen Bereich stromunabhängig und erst von einem bestimmten Grenzwert an setzt starker Abfall ein. So verhalten sich Solarzellen und „elektronische Netzgeräte“ mit Strombegrenzung oder ein Gleichstrom-Nebenschlussgenerator.

Eine Quelle hat zwei ausgezeichnete Betriebsfälle:

- den *Leerlauf* (open circuit, L) ohne Stromentnahme ($I = 0$). Dabei wird an den Klemmen die *Leerlaufspannung* (open circuit voltage) U_L gemessen, auch als *Quellenspannung* U_q als originäres Merkmal der Spannungsquelle bezeichnet,
- den *Kurzschluss* (short circuit, K) mit idealer Leiterverbindung der beiden Klemmen ($U = 0$). Dann fließt der *Kurzschlussstrom* (short-circuit current) I_k , auch als *Quellenstrom* I_q als Merkmal der Stromquelle benannt.

Ob ein Kurzschluss technisch durchführbar ist, hängt vom aktiven Zweipol ab. So verträgt eine Solarzelle durchaus einen zeitlich begrenzten Kurzschlussbetrieb, eine (kleine) Batterie erwärmt sich durch Überlastung, doch bei einer Autobatterie besteht Explosionsgefahr. Im Kraftwerk schließlich hätte ein Kurzschlussversuch katastrophale Folgen. Deshalb eignet sich der Kurzschlussstrom zwar als Modellgröße, bestimmt werden muss er in der realen Welt anders als durch Kurzschluss.

In Abb. 2.2 wurden für Spannungs- und Stromquelle gleiche Diagrammformen $U(I)$ gewählt, verbreitet ist für Stromquellen auch die Form $I(U)$. Wir nutzen sie später.

2.2.1 Ideale Spannungs- und Stromquellen

Die Grundelemente zur Modellierung technischer Spannungs- und Stromquellen sind (unabhängige) *ideale Spannungs- und Stromquellen*.^{1, 2}

Ideale Spannungsquelle

- ▶ Ein Zweipol mit stromunabhängiger Klemmenspannung U_q heißt *ideale Spannungsquelle* (ideal voltage source). Sie ist ein Netzwerkelement zur Modellierung realer elektrischer Spannungsquellen. Dabei kann es sich um eine zeitlich konstante oder zeitveränderliche Spannung handeln.

Gleichwertige Begriffe sind ideale Spannungsquelle, Urspannungsquelle, eingeprägte oder starre, vom Strom I unabhängige Spannung.

Abbildung 2.3 zeigt das Strom-Spannungsverhalten der Quellen und typische Schaltzeichen. Die Strom- und Spannungszählpfeile werden zweckmäßig nach dem Erzeuger-

¹ Gesteuerte Quellen (Abschn. 2.6) sind das Gegenstück zu unabhängigen Quellen.

² Der Hinweis auf Unabhängigkeit unterbleibt künftig, dafür wird die Abhängigkeit durch den Begriff „gesteuerte Quelle“ hervorgehoben.

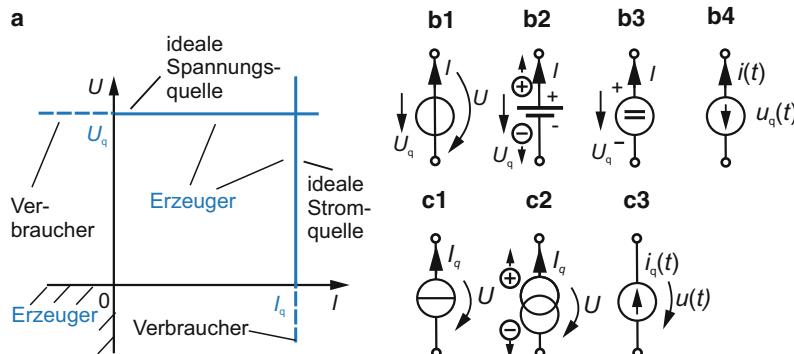


Abb. 2.3 Ideale Quellen. **a** Strom-Spannungskennlinie, Erzeuger- und Verbraucherpfeilrichtung (der dritte Quadrant gilt für Vorzeichenwechsel von U und I). **b1** Schaltzeichen der Spannungsquelle nach DIN EN 60617-2:1997. **b2** Schaltzeichen bevorzugt für Gleichspannungsquellen (mit oder ohne Polaritätsangabe). **b3** Weniger benutztes Schaltzeichen. **b4** Schaltzeichen für zeitveränderliche Spannung. **c1** Schaltzeichen der Stromquelle entspr. **b1**. **c2** Schaltzeichen bevorzugt für Gleichstromquellen und zeitveränderliche Quellen (**c3**)

pfeilsystem (EPS) orientiert. Dann arbeitet die Spannungsquelle entweder im 1. oder 3. Quadranten der I, U -Kennlinie, letztere bei Richtungsumkehr von U und I , wie sie bei Wechselspannungen auftritt. Im 2. oder 4. Quadranten wirkt die Quelle als passiver Zweipol. Dieser Fall tritt z. B. beim Aufladen einer Batterie auf (Gegenschalten einer Spannungsquelle).³

Im Schaltzeichen deutet die durchgehende Linie symbolisch auf den Innenwiderstand null. Früher benutzte Schaltzeichen (z. B. für Batterie mit Polaritätsangabe) sollten nicht mehr verwendet werden, sind aber aus Anschauungsgründen noch verbreitet. Oft werden Hinweise auf die Strom-/Spannungsart am Quellsymbol vermerkt.

Für den Umgang mit idealen Spannungsquellen ist zu beachten:

- ▶ 1. Die ideale Spannungsquelle darf nie über eine äußere widerstandslose Leiterverbindung kurzgeschlossen werden, weil es keinen Punkt auf der I, U -Kennlinie mit $U = 0$ gibt.
- 2. Eine ideale Spannungsquelle mit der Quellenspannung $U_q = 0$ wirkt wie ein Kurzschluss ihrer Klemmen.

Dieser Zustand wird bei Anwendung des Überlagerungssatzes und der Zweipoltheorie benötigt und sprachlich lax als „Kurzschluss“ der Spannungsquelle bezeichnet.⁴

³ Ideale Spannungs- (und z. T. Stromquellen) dienen als Verbraucher auch zur abschnittsweisen Beschreibung des Verhaltens technischer Bauelemente durch *Knickkennlinien*, wie beispielsweise bei der Diode und Z-Diode.

⁴ Man sollte korrekter von „Nullsetzen“ sprechen mit $U_q = 0$ oder dem Ersatz der Spannungsquelle durch Kurzschluss.

Der Vorteil der Ersatzschaltung Abb. 2.3 ist, dass bei bekannter Quellenspannung U_q auf Einzelheiten innerer Vorgänge verzichtet werden kann mit einer Ausnahme: die Vorgabe eines inneren Richtungssinnes durch fortwährende *Ladungstrennung als Ursache der Spannungserzeugung*. Die Folge ist ein Überschuss positiver Ladungen an einer Klemme und ein negativer an der anderen und wir sprechen von *Plus- und Minuspolen*. Dann weist der Richtungssinn der Quellenspannung U_q vom Plus- zum Minuspol und lässt sich (mit gleicher Richtung) als *Spannungsabfall* durch einen Spannungsmesser bestimmen.

Eine ideale Spannungsquelle kann auch einen zeitabhängigen, z. B. sinusförmigen Verlauf haben wie bei der *Wechselspannungsquelle*, wieder mit der Voraussetzung, dass die Quellenspannung $u_q(t)$ zu jedem Zeitpunkt unabhängig vom durchfließenden Strom ist.

Ideale Stromquelle Das Gegenstück zur idealen Spannungsquelle ist die ideale Stromquelle (ideal current source).

- ▶ Ein Zweipol mit belastungsunabhängigem Klemmenstrom, dem *Quellenstrom* $I_q(t)$ heißt unabhängige ideale oder kurz *ideale Stromquelle*. Der Quellenstrom kann zeitlich konstant oder veränderlich sein.

Gleichwertige Begriffe sind „Einströmung“, eingeprägter oder starrer Strom, auch Quellenstrom oder Urstromquelle.

Bei zeitlich konstantem Strom liegt eine *ideale Gleichstromquelle* I_q vor. Im Erzeugergerüstsysten hat sie eine Kennlinie im 1. resp. 3. Quadranten, im 2. und 4. wirkt sie als Leistungsverbraucher.

Abbildung 2.3c zeigt übliche Schaltzeichen. Der Bezugspfeil von I_q (wie der von U_q) gehört zum Quellsymbol. Der Querstrich deutet einen unendlich hohen Innenwiderstand an. Abweichend von der Norm sind weitere Quellsymbole üblich, auch solche, die eine nähere Kennzeichnung z. B. für Wechselstrom tragen.

Der Richtungssinn des Quellenstromes I_q folgt aus der bereits erklärten Ladungstrennung in der Quelle. Danach fließt der Quellenstrom vom Minus- zum Pluspol durch die Quelle und vom Plus zum Minuspol über den äußeren Stromkreis; *Strom als in sich geschlossenes Band*, s. Abb. 1.7d.

- ▶ So, wie die ideale Spannungsquelle nie im Kurzschluss betrieben werden darf, ist Leerlauf der idealen Stromquelle nie zulässig.

Deshalb kann sie streng genommen nie im Leerlauf dargestellt werden (Widerspruch zum Strom als ununterbrochenem Band, Verletzung des Knotensatzes). Erfordert ein Netzwerkanalyseverfahren dennoch die zeitweilige Nullsetzung des Wertes I_q , so wirkt der Ersatzzweipol als Leerlaufstrecke (Leitungsunterbrechung).

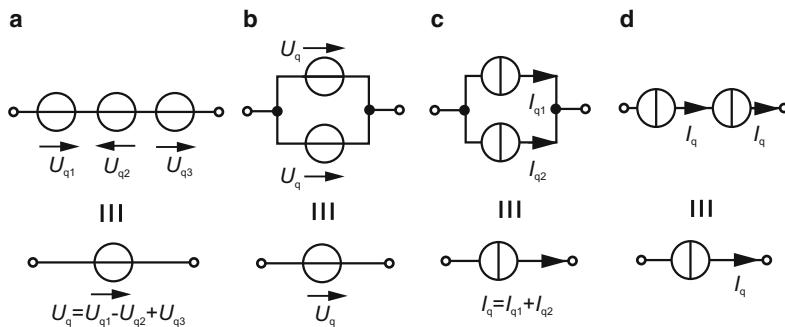


Abb. 2.4 Zusammenschaltung idealer Quellen. **a** Reihenschaltung idealer Spannungsquellen. **b** Parallelschaltung nur gleicher idealer Spannungsquellen zulässig. **c** Parallelschaltung idealer Stromquellen. **d** Reihenschaltung nur gleicher idealer Stromquellen zulässig

Zusammenschaltung idealer Quellen

- *reihengeschaltet* und durch eine ideale *Ersatzspannungsquelle*

$$U_q = \sum_{v=1}^n U_{qv} \quad \begin{array}{l} \text{Reihenschaltung} \\ \text{idealener Spannungsquellen} \end{array} \quad (2.2.1)$$

ersetzt werden (Abb. 2.4a, b),

- *nur bei gleichen* Quellenspannungen (Richtung, Wert) *parallel geschaltet* werden.

Ideale Stromquellen dürfen

- *parallel geschaltet werden* mit der *Ersatzquelle* I_q nach dem Knotensatz (Abb. 2.4c, d)

$$I_q = \sum_{v=1}^n I_{qv}, \quad \begin{array}{l} \text{Parallelschaltung} \\ \text{idealener Stromquellen} \end{array} \quad (2.2.2)$$

- *nur bei gleichen* Quellenströmen (Richtung, Wert) *reihengeschaltet* werden.

Für Quellen mit Innenwiderstand gelten diese Beschränkungen nicht.

2.2.2 Reale Spannungs- und Stromquellen

Technische Spannungs- und Stromquellen Ideale Quellen kennt die reale Welt nicht. Trotzdem eignen sie sich gut zur Modellierung realer oder technischer Spannungs- und Stromquellen mit inneren Verlusten, die durch einen linearen/nichtlinearen *Innenwiderstand* darstellbar sind. Dadurch wird das Klemmenverhalten der Quelle lastabhängig. Beispielsweise haben *Konstantspannungsgeräte*, die dem Namen nach ideale Spannungsquellen vermuten lassen, zwar eine einstellbare Konstantspannung, doch sinkt sie bei Strombelastung, je nach Gerätegüte, um einige % ab.

Reale Quellen werden modelliert als

- Spannungsquellen mit stromabhängigen inneren Spannungsabfall $U_i(I)$ durch den linearen/nichtlinearen Innenwiderstand R_i (Abb. 2.2a),
- Stromquellen mit (spannungsabhängigem) inneren „Stromverlust“ $I_i(U)$ durch den linearen oder nichtlinearen Innenleitwert G_i (Abb. 2.2b).

Häufig kann der Innenwiderstand R_i als konstant angesehen werden. Dann ist der innere Spannungsabfall $U_i(I) = IR_i$ stromproportional und der Verluststrom $I_i(U) = G_iU$ spannungsproportional. So entstehen

- die *lineare Spannungsquelle mit der Klemmenspannung*

$$U = U_q - IR_i. \quad \text{Strom-Spannungsbeziehung, EPS} \quad (2.2.3)$$

Abbildung 2.5a zeigt die U, I -Kennlinie. Die Klemmenspannung U fällt linear mit dem Strom zwischen U_q und dem Kurzschluss $U = 0$ ab. Dabei fließt der *Kurzschlussstrom* $I_k = I(U = 0)$

$$I|_{U=0} = I_k = \frac{U_q}{R_i}. \quad \text{Kurzschlussstrom} \quad (2.2.4)$$

- Die reale Spannungsquelle entspricht der idealen Spannungsquelle um so besser, je kleiner ihr Innenwiderstand R_i ist. Im Grenzfall $R_i = 0$ geht sie in die ideale über und es gilt:
Die Ersatzschaltung „lineare Spannungsquelle“ mit Quellenspannung U_q und Innenwiderstand R_i beschreibt das Verhalten des linearen aktiven Zweipols bezüglich seines Verhaltens an den Klemmen AB eindeutig und unabhängig von inneren physikalischen Vorgängen.

Abbildung 2.5 bestätigt das Erzeugerpfeilsystem als natürliche Strom-Spannungszuordnung an den Klemmen AB aus der Stromflussrichtung, die sich im angedeuteten Verbraucherwiderstand R_a fortsetzt.



<http://www.springer.com/978-3-642-53947-3>

Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik 1

Gleichstromnetzwerke und ihre Anwendungen

Paul, S.; Paul, R.

2014, XVI, 446 S. 165 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-642-53947-3