



Ersatzspannungsquellen und Ersatzstromquellen

Schaltelemente, die elektrische Energie bereitstellen, können sowohl als Spannungsquelle als auch als Stromquelle bezeichnet werden. Beide Begriffe sind gleichwertig. Im Gegensatz dazu müssen die Bezeichnungen Ersatzspannungsquelle und Ersatzstromquelle eindeutig unterschieden werden.

In Generatoren als aktive Zweipole werden zum Beispiel durch Induktion die elektrischen Ladungen in den Generatorwicklungen getrennt, so dass an ihren Klemmen eine Spannung nachweisbar ist. Berechtigt wird durch diesen physikalischen Vorgang der Generator als Spannungsquelle bezeichnet. Wird ein passiver Zweipol angeschlossen, fließt ein elektrischer Strom. Der Generator ist somit auch eine Stromquelle.

Die Gesetzmäßigkeiten des einfachen Stromkreises werden durch die Betriebszustände Leerlauf, Belastung und Kurzschluss beschrieben.

INHALT

Grundwissen
Lernfelder 1-5

Elektrotechnik

Ersatzspannungsquellen und Ersatzstromquellen 1

Fachbegriffe

Was versteht man unter 5

Fachwissen
Lernfelder 6-13

Regelungstechnik

Temperaturmesstechnik (5) 7

Antennentechnik

Satellitenempfang (9) 8

WISO

Wirtschafts-, Sozial- und Gemeinschaftskunde 10

Arbeitssicherheit

Stromerzeuger auf Baustellen (1) 11

Fremdsprache

Technisches Englisch 13

Prüfung
Lernfelder 1-13

Fachtest

Fachtest Steuerungstechnik (ST) ...14

Lösungen 16

■ Einfacher Stromkreis

Im einfachen Stromkreis sind zwei Zweipole über entsprechende Leitungen miteinander verbunden. Ganz allgemein ist ein Zweipol der zwischen zwei Klemmen befindliche Teil eines Netzwerkes. Er kann, wie im einfachen Stromkreis, aus einem Widerstand und einer Stromquelle bestehen, kann aber auch vermaschte Stromkreisteile enthalten. Zweipole werden als aktiv bezeichnet, wenn sie durch Umwandlung elektrische Energie bereitstellen. Passive Zweipole nehmen elektrische Energie auf und wandeln sie in eine andere Energieform um. Der Elektrotechniker bezeichnet sie als Verbraucher.

■ Gesetzmäßigkeiten

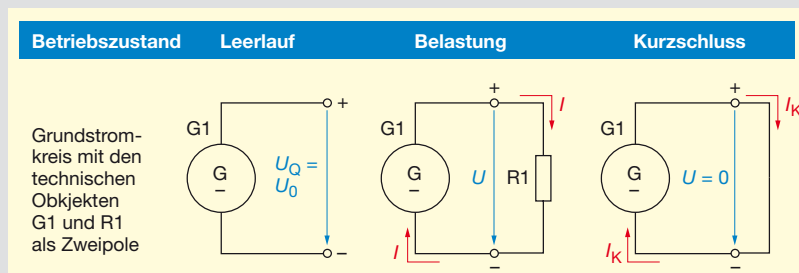
Leerlauf. Im Leerlauf (Bild 1) ist an dem Generator G1 kein Verbraucher angeschlossen. Der Stromkreis ist nicht geschlossen. Es kann kein Strom fließen: $I = 0$. Zwischen den Klemmen des Zweipols liegt jedoch die Quellenspannung U_0 an, die entsprechend des Betriebszustandes auch als Leerlaufspannung U_0 bezeichnet wird: $U_0 = U_0$.

Belastung. Bei Belastung (Bild 1) wird der Stromkreis über den Lastwiderstand R_1 geschlossen. Es sind die Voraussetzung „antreibende Spannung“ und die Bedingung „geschlossener Stromkreis“ erfüllt. Der Strom I fließt. Damit gibt der

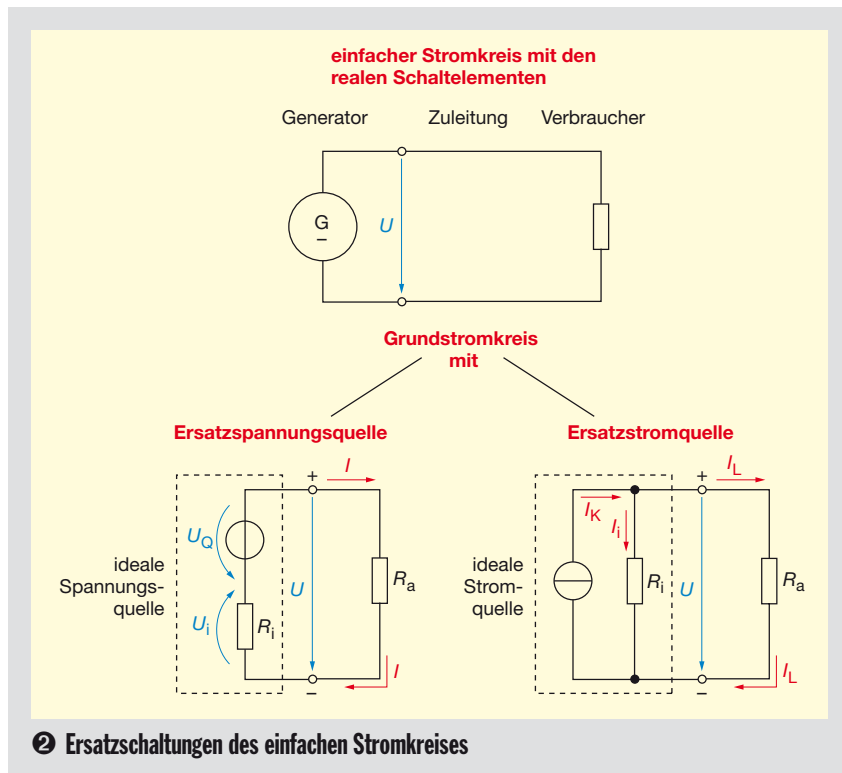
Generator elektrische Energie an den Verbraucher ab, die in ihm in eine andere Energieform umgewandelt wird. Der Strom als Kriterium des Energietransportes fließt auch durch den Generator. Da jeder Stromweg widerstandsbehaftet ist, wird der Generator deshalb durch zwei elektrischen Größen Quellenspannung U_0 und Innenwiderstand R_i gekennzeichnet. In Abhängigkeit von dem Betrag der Stromstärke verringert sich die Spannung U an den Generatorklemmen: $U < U_0$.

Kurzschluss. Der Grenzzustand Kurzschluss (Bild 1) tritt dann ein, wenn die Generatorklemmen widerstandslos verbunden werden. Die Stromstärke steigt als Kurzschlussstrom I_k auf ihren maximalen Wert an. Die Klemmenspannung bricht zusammen: $U = 0$.

Anmerkungen zu Bild 1. In den für die Elektrotechnik typischen Darstellungen werden die realen Betriebsmittel durch grafische Symbole (Schaltzeichen) dargestellt. Diese werden oft nach DIN EN 61346-1 durch eine anwendungsneutrale Kennzeichnung für technische Produkte mit Referenzkennzeichen ergänzt. Im Bild 1 sind es Buchstaben gefolgt von einer Zahl. Zusätzlich sind elektrische Größen durch ihre Formelzeichen angegeben. Eine eindeutige Zuordnung ist dadurch mög-



1 Betriebszustände des einfachen Stromkreises



lich, dass die Formelzeichen kursiv gesetzt werden und Ergänzungen durch Indizes möglich sind. Zum Beispiel ist R_1 das Referenzkennzeichen des technischen Objekts *Widerstand* und R_1 die *physikalische Größe* des Widerstandes.

Grundstromkreis

Wird der Widerstand der Zuleitung dem Lastwiderstand R_1 zugeordnet, entsteht aus dem realen Objekt *einfacher Stromkreis* das Modell des sogenannten *Grundstromkreises*. Sein äußerer Teil wird durch den Außenwiderstand R_a als passiver Zweipol gebildet. Den elektrischen Ladungen wird in der Stromquelle Energie zugeführt. In den Widerständen des Grundstromkreises R_i und R_a geben die Ladungen die aufgenommene Energie wieder ab. Nach dem Energieerhaltungssatz ist

$$W_{zu} = W_{ab}$$

Da elektrische Energie das Produkt aus Spannung mal Ladungsmenge ist, ergibt sich mit der Quellenspannung U_Q , der Klemmenspannung bzw. dem Spannungsfall U über dem Außenwiderstand und dem inneren Spannungsfall U_i

$$U_Q \cdot Q = U \cdot Q + U_i \cdot Q$$

und für die Quellenspannung:

$$U_Q = U + U_i \quad (1)$$

Wird nach dem ohmschen Gesetz für $U = I \cdot R_a$ und $U_i = I \cdot R_i$ gesetzt sowie nach

I umgestellt, berechnet sich die Stromstärke im Grundstromkreis

$$I = \frac{U_Q}{R_i + R_a} \quad (2)$$

Im Inneren der Stromquelle wird durch den Innenwiderstand ein Teil der elektrischen Energie in Wärme umgesetzt. Damit die Wärmeentwicklung begrenzt wird, darf der Belastungsstrom bei Dauerbetrieb den technologisch vorgegebenen Bemessungsstrom nicht überschreiten.

Aus den Gleichungen (1) und (2) können die Gesetzmäßigkeiten der Grenzzustände abgeleitet werden.

Leerlauf:

$$R_a = \infty \rightarrow I = 0 \rightarrow U_i = 0$$

$$\rightarrow U = U_0 = U_Q$$

Kurzschluss:

$$R_a = 0 \rightarrow I = I_K$$

$$\rightarrow U_i = I_K \cdot R_i = U_Q \rightarrow U = 0$$

Ersatzschaltbilder

Ersatzschaltbilder – als typische Modelle der Elektrotechnik – stellen mehr oder weniger komplizierte Zusammenschaltungen der Grundschaltelemente *Widerstand*, *Induktivität* und *Kapazität* mit anderen Schaltelementen zum Beispiel Stromquellen dar. Solche Netzwerke erfassen technische Geräte oder Anordnungen in ihrer Wirkungsweise mit hinreichender Annäherung an die Realität. Insbesondere in der mathematischen Analyse sind Ersatzschaltbilder vorteilhaft.

Wenn Gesetze und Wirkprinzipien der Elektrotechnik in Verbindung mit Grundschaltelementen auftreten, kann geschlussfolgert werden, dass umgekehrt Baugruppen und Geräte mit ihren Wirkprinzipien als Zusammenschaltung von entsprechenden Grundschaltelementen aufgefasst und dargestellt werden können. Die elektrotechnischen Zusammenhänge werden somit durch schaltungstechnische Verknüpfungen sichtbar.

Ausgangspunkt des vorstehenden Abschnitts ist der einfache Stromkreis mit den realen Teilen Generator (Stromquelle), Leitungen und Verbraucher. Ohne Schwierigkeiten wurde bereits der Verbraucher durch die physikalische Größe *Lastwiderstand*, die Leitungen durch den *Leitungswiderstand* ersetzt sowie beide zum *Außenwiderstand* R_a zusammengefasst. Das Widerstandsschaltzeichen symbolisiert damit die physikalische Größe R_a . Den Grundstromkreis vollständig durch ein Ersatzschaltbild zu erfassen heißt, die charakteristischen Größen *Quellenspannung* U_Q und *Innenwiderstand* R_i des Generators zusätzlich zu integrieren. Die Zuordnung von U_Q und R_i ist durch die Anwendung des Maschensatzes und des Knotenpunktsatzes unproblematisch.

Ersatzspannungsquelle

Nach dem Maschensatz ist allgemein die Summe der vorzeichenbehafteten Spannungen gleich null. Im Speziellen gilt auch: In einer Masche ist die den Strom antreibende Spannung (Gesamtspannung) gleich der Summe der Spannungsfälle (Teilspannungen). Eine Spannung wird grundsätzlich nur in einer Reihenschaltung von Widerständen geteilt. Nach Gleichung (1) ist die Quellenspannung U_Q die Gesamtspannung des Grundstromkreises. Sie wird in die Klemmenspannung U als Spannungsfall über dem Außenwiderstand und in den inneren Spannungsfall U_i geteilt. Der Außenwiderstand R_a und der Innenwiderstand R_i müssen somit in Reihe geschaltet sein. Die Ersatzschaltung des Grundstromkreises ist deshalb ein unverzweigter Stromkreis mit der idealen Spannungsquelle in Reihe zum Innen- und Außenwiderstand (Bild ②).

Ideale Spannungsquellen haben keinen Innenwiderstand. Der Betrag ihrer Spannung (Quellenspannung U_Q) ist unabhängig von der Belastung, somit konstant. Da in Abhängigkeit von der Stromstärke I der Spannungsfall U_i über dem Innenwiderstand R_i entsteht, ist in Übereinstimmung mit Gleichung (1) der Spannungsfall U

über dem Außenwiderstand R_a kleiner als die Quellenspannung bzw., die Klemmenspannung U des realen Generators hat sich bei Belastung durch den inneren Spannungsfall verringert: $U = U_Q - I \cdot R_i$.

Ein realer Generator kann als Ersatzschaltbild durch eine ideale Spannungsquelle mit fester (eingepprägter) Quellenspannung U_Q und dem in Reihe geschalteten Innenwiderstand R_i dargestellt werden.

Prinzipiell ist jeder aktive Zweipol an der zwischen seinen Klemmen anliegenden Spannung zu erkennen. Er kann als Netzwerkteil mehrere Quellenspannungen und auch Widerstände enthalten (Bild 3). Auch dieser aktive Zweipol kann durch eine Ersatzspannungsquelle ersetzt, damit das gesamte Netzwerk vereinfacht werden.

Genauer soll die in der Praxis häufig angewendete Spannungsteilerschaltung (Bild 4) untersucht werden. Wie Bild 4 zeigt, kann das Netzwerk unter zwei Gesichtspunkten betrachtet werden.

- Der aktive Zweipol zwischen den Klemmen A und B besteht aus den Batterien G1 und G2. Zum passiven Zweipol gehören dann die Spannungsteilerwiderstände R1 und R2 sowie der Lastwiderstand R3 oder
 - dem aktiven Zweipol werden neben den Batterien auch die Spannungsteilerwiderstände R1 und R2 zugeordnet. Der an den Klemmen C und D angeschlossene passive Zweipol besteht jetzt nur noch aus dem Lastwiderstand R3.
- Die Bauelemente der Schaltung (Bild 4)

werden durch folgende elektrische Größen charakterisiert:

G1; G2 Quellenspannungen U_{Q1} ; U_{Q2}
Innenwiderstände R_{i1} ; R_{i2}

R1; R2; R3 Widerstandswerte R_1 ; R_2 ; R_3
Für die Ersatzspannungsquellen sind zu bestimmen:

1. Quellenspannungen U_Q und U_Q' . Sie sind die Leerlaufspannungen an den entsprechenden Klemmen, das heißt ohne Anschluss der passiven Zweipole der Ausgangsschaltung.
2. Innenwiderstände R_i und R_i' . Dazu sind in den aktiven Zweipolen alle Quellenspannungen auszuschalten, indem sie durch Brücken kurzgeschlossen werden. Der von den Klemmen aus gesehene Gesamtwiderstand der entstandenen passiven Zweipole entspricht jetzt den Innenwiderständen der Ersatzspannungsquellen.

In Abhängigkeit von der Betrachtungsweise der Ausgangsschaltung ergeben sich für die Ersatzspannungsquelle des aktiven Zweipols AB

Leerlaufspannung $U_0 = U_{Q1} + U_{Q2}$
Innenwiderstand $R_i = R_{i1} + R_{i2}$ und für die Ersatzspannungsquelle des aktiven Zweipols CD Leerlaufspannung

$$U_0' = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_1 + R_2} \cdot (U_{Q1} + U_{Q2})$$

Innenwiderstand

$$R_i' = \frac{(R_{i1} + R_{i2} + R_1) \cdot R_2}{(R_{i1} + R_{i2} + R_1) + R_2}$$

Wie aus Bild 5 zu erkennen ist, sind an die Ersatzspannungsquellen die entsprechenden passiven Zweipole der Ausgangs-

schaltung anzuschließen. Soll für den Lastwiderstand R3 Stromstärke und Spannung bestimmt werden, ist die Wahl der Ersatzspannungsquelle CD vorteilhaft.

Ersatzstromquelle

Grundlage für die Entwicklung einer Ersatzstromquelle ist der Knotenpunktsatz, der für die Parallelschaltung der Widerstände R_1 und R_2 mathematisch durch das Gesetz der Stromteilung als Verhältnis der Teilströme

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

oder als Verhältnis Teilstrom zu Gesamtstrom beschrieben wird:

$$\frac{I_1}{I_{\text{ges}}} = \frac{R_{\text{ges}}}{R_1}$$

$$R_{\text{ges}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

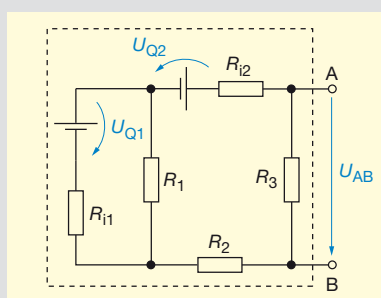
$$I_1 = I_{\text{ges}} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

Wie im ersten Abschnitt nachgewiesen wurde, ist die Stromstärke des Grundstromkreises nach (2) im Betriebszustand Belastung

$$I = \frac{U_Q}{R_i + R_a}$$

und im Betriebszustand Kurzschluss

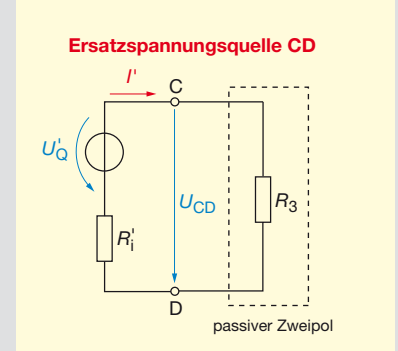
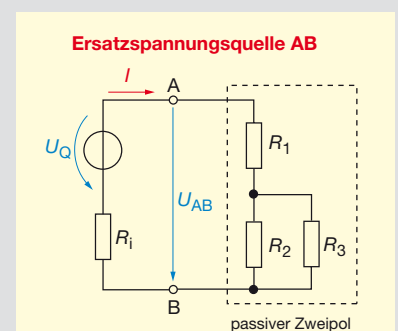
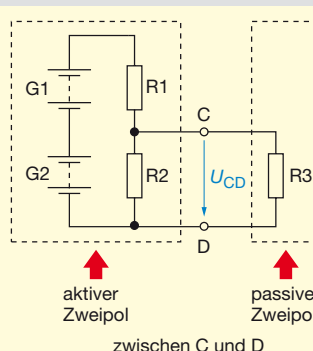
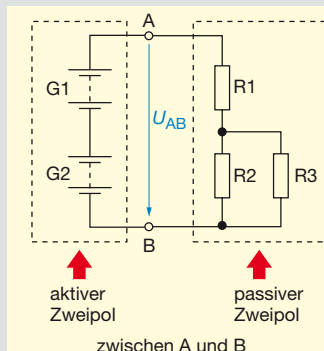
$$I_K = \frac{U_Q}{R_i}$$



◀ 3 Netzwerkteil als aktiver Zweipol zwischen den Klemmen A und B

5 Passive Zweipole der Ersatzspannungsquellen ▶

4 Zweipole mit Spannungsteiler ▼



Werden beide Gleichungen ins Verhältnis gesetzt, ist

$$\frac{I}{I_K} = \frac{U_Q}{R_i + R_a} \cdot \frac{R_i}{U_Q}$$

bzw.

$$I = I_K \cdot \frac{R_i}{R_i + R_a} \quad (4).$$

Da Gleichung (4) demselben Bildungsgesetz wie Gleichung (3) folgt, muss der mathematische Ausdruck (4) einer Parallelschaltung von R_i und R_a zugeordnet werden.

Ein realer Generator bzw. jeder aktive Zweipol kann durch eine ideale Stromquelle, die unabhängig von der Belastung stets einen konstanten Quellenstrom I_K liefert, und durch einen parallel geschalteten Innenwiderstand R_i als Ersatzstromquelle dargestellt werden (Bild 2).

Der Innenwiderstand der idealen Stromquelle besitzt dann einen (gedachten) unendlich großen Widerstandswert (vergleiche auch den „Querstrich“ im Schaltzeichen). Da der Widerstandswert eines angeschlossenen passiven Zweipols den Laststrom I_L bestimmt, muss durch die Konstanz des eingepprägten Quellenstroms I_K der Strom I_i durch den Innenwiderstand lastabhängig sein.

Für die Ersatzstromquelle sind in Abhängigkeit von der realen Schaltung zu bestimmen:

1. Innenwiderstand R_i . Analog der Bestimmung des Innenwiderstandes der Ersatzspannungsquelle ist bei der Ersatzstromquelle der von den kurzgeschlossenen Klemmen der Ausgangsschaltung aus gesehene Gesamtwiderstand gleich dem Innenwiderstand R_i , der jedoch parallel zu idealen Stromquelle liegt.
2. Quellenstrom I_K , der nach dem ohmschen Gesetz sich als Quotient aus der

Quellenspannung U_Q zum Innenwiderstand R_i ergibt:

$$I_K = \frac{U_Q}{R_i}$$

Wie im Bild 4 dargestellt, ergeben sich je nach Lage des Kurzschlusses (AB oder CD) unterschiedliche Beträge für R_i und I_K der entsprechenden Ersatzstromquellen. Prinzipiell kann jeder aktive Zweipol in eine Ersatzspannungs- oder in eine Ersatzstromquelle umgewandelt werden. Beide Ersatzschaltungen stimmen dann elektrisch überein, wenn für die Ersatzquellen die Beträge der Innenwiderstände gleich sind sowie der Quotient U_Q zu R_i gleich I_K ist.

Beispielrechnung

Zur Bestätigung der Gleichwertigkeit beider Ersatzschaltungen werden für die Spannungsteilerschaltung (Bild 4) mit dem passiven Zweipol zwischen CD folgende Werte vorgegeben:

- G1; G2 Quellenspannungen
 $U_{Q1} = U_{Q2} = 22 \text{ V}$
 Innenwiderstände
 $R_{i1} = R_{i2} = 1,8 \Omega$
 R1; R2; R3 Widerstandswerte $R_1 = 120 \Omega$;
 $R_2 = 30 \Omega$; $R_3 = 60 \Omega$

Ersatzspannungsquelle

Leerlaufspannung

$$U_2 = \frac{R_2}{R_{i1} + R_{i2} + R_1 + R_2} \cdot (U_{Q1} + U_{Q2})$$

$$U_2 = \frac{30 \Omega}{1,8 \Omega + 1,8 \Omega + 120 \Omega + 30 \Omega} \cdot 44 \text{ V}$$

$$U_2 = 8,594 \text{ V}$$

Innenwiderstand

$$R_i = \frac{(R_{i1} + R_{i2} + R_1) \cdot R_2}{(R_{i1} + R_{i2} + R_1) + R_2}$$

$$R_i = \frac{123,6 \Omega \cdot 30 \Omega}{153,6 \Omega} = 24,14 \Omega$$

Laststrom

$$I_3 = \frac{U_2}{R_i + R_3}$$

$$I_3 = \frac{8,594 \text{ V}}{84,14 \Omega} = 102,14 \text{ mA}$$

Spannung am Lastwiderstand

$$U_3 = I_3 \cdot R_3 = 0,10214 \text{ A} \cdot 60 \Omega$$

$$U_3 = 6,128 \text{ V}$$

Ersatzstromquelle

Kurzschluss an CD:

Quellenstrom

$$I_K = \frac{U_{Q1} + U_{Q2}}{R_{i1} + R_{i2} + R_1}$$

$$I_K = \frac{44 \text{ V}}{123,6 \Omega} = 356 \text{ mA}$$

Innenwiderstand

$$R_i = \frac{(R_{i1} + R_{i2} + R_1) \cdot R_2}{(R_{i1} + R_{i2} + R_1) + R_2}$$

$$R_i = \frac{123,6 \Omega \cdot 30 \Omega}{153,6 \Omega} = 24,14 \Omega$$

Spannung am Lastwiderstand ($R_i \parallel R_3$)

$$U_3 = \frac{R_3 \cdot R_i}{R_3 + R_i} \cdot I_K$$

$$U_3 = \frac{60 \Omega \cdot 24,14 \Omega}{84,14 \Omega} \cdot 0,356 \text{ A}$$

$$U_3 = 6,128 \text{ V}$$

Laststrom

$$I_3 = \frac{U_3}{R_3} = \frac{6,128 \text{ V}}{60 \Omega} = 102,14 \text{ mA}$$

Beide Rechenwege führen zu den selben Beträgen von Spannung und Strom am Lastwiderstand.

Fazit

Gesetze und Wirkungsprinzipien der Elektrotechnik treten in Verbindung mit entsprechenden Grundschaltelementen auf. Ihre schaltungstechnische Verknüpfung erfassen somit elektrotechnische Zusammenhänge der Baugruppen und Geräte. Der Vorteil, reale aktive Zweipole entweder als Ersatzspannungsquellen (Leerlaufspannungs-Ersatzschaltung) oder als Ersatzstromquellen (Kurzschlussstrom-Ersatzschaltung) zu betrachten, erleichtert ihr Verhalten in den verschiedenen Betriebszuständen mathematisch zu beschreiben und vereinfacht die entsprechenden Berechnungen. Ersatzspannungsquellen werden dann bevorzugt, wenn der Innenwiderstand wesentlich kleiner als der Lastwiderstand ist.

H. Spanneberg

