

2 Elektrizität

Elektrische Grundlagen und regelungstechnische Grundkenntnisse werden bei den meisten Simulationen gebraucht.

Weil elektrische Spannungen und Ströme relativ einfach zu messen sind (Multimeter, Oszilloskop), hat der Autor zur Simulation Grundsaltungen aus dem Bereich ‚Elektrizität‘ gewählt. Sie werden als Vierpole behandelt und mit regelungstechnischen Mitteln (Strukturen) analysiert und simuliert.



Gezeigt werden soll, wie die vom Anwender geforderten Schaltungseigenschaften von den Bauelementen abhängen. Damit lassen diese sich dimensionieren. Auch zur Fehleranalyse ist dieses Wissen unerlässlich.

Was Sie in Kap. 2 lernen:

- elektrische Zweipole und Vierpole
- Spannungsteiler und Überlagerungsprinzip
- Diode, Gleichrichter und Netzteile
- Der Operationsverstärker und seine Grundsaltungen
- Die Bauelemente R, C und L
- Kondensatoren bei Gleich- und Wechselstrom
- Elektrofilter

Warum Sie Kap. 2 lesen sollten:

1. Sie erhalten vertiefte Grundkenntnisse der elektrischen Strömung und der Ladungsspeicherung.
2. Sie erlernen die Berechnung komplexer Systeme mittels Überlagerungsgesetz.
3. Sie erkennen die Ähnlichkeiten bei der Berechnung elektrischer und magnetischer Felder.

Diese Methoden werden in den folgenden Bänden angewendet. Sie sollen Sie in den Stand versetzen, eigene Systeme analysieren und zu simulieren zu können.

Einführung:

Das erste Kapitel hat gezeigt, dass der Umgang mit dem Simulationswerkzeug SimApp nach der unvermeidlichen Eingewöhnung letztlich gar nicht so schwierig ist. Das eigentliche Problem bei Simulationen liegt daher auch in der **Ermittlung der Struktur** eines gegebenen oder geplanten Systems. Die Fähigkeit zur Strukturbildung zu vermitteln, ist das wichtigste Anliegen des Autors. Die verwendete Methode heißt Beispiele, Beispiele und nochmals Beispiele – und zwar aus möglichst vielen Gebieten der Physik und Technik.

Bekannt ist zu Anfang nur die Idee oder der Bauplan eines Systems. Wenn dieses nicht mehr elementar ist, werden das Detailverständnis und die Berechnung kompliziert. Allein der Rechenaufwand ist per Hand kaum noch zu bewältigen. Wir verwenden daher die Strukturmethode zur Erklärung und Darstellung aller Detailfunktionen und ihrer Verknüpfungen. Sie werden durch die SimApp Zeichnung **dokumentiert**. Wenn bei komplexen Systemen mit Blöcken gearbeitet wird, bleiben auch diese immer übersichtlich.

Strukturen zeigen den aktuellen Stand der Erkenntnis. Deshalb wird die einfachste und klarste Struktur meist erst nach einigen Versuchen und Irrtümern gefunden. Die Simulation und der Vergleich mit bekannten Realitäten (Stützwerte) zeigen die Fehler auf. Durch offene (unerklärte) Signalleitungen, die weder Ein- noch Ausgänge sind, sagt Ihnen eine Struktur zudem noch, dass der Algorithmus noch unvollständig ist. Das erfordert dann noch weiteres Nachdenken. Das zeigen wir nun anhand elektrischer Beispiele.

2.1 Elektrische Grundlagen

Zur Simulation elektrischer Schaltungen benötigen wir

- das **ohmsche Gesetz** $i = u/R$:

Es beschreibt die Proportionalität von Spannungen u und Strömen i bei linearen elektrischen Widerständen $R = u/i$ (Abb. 2-1)

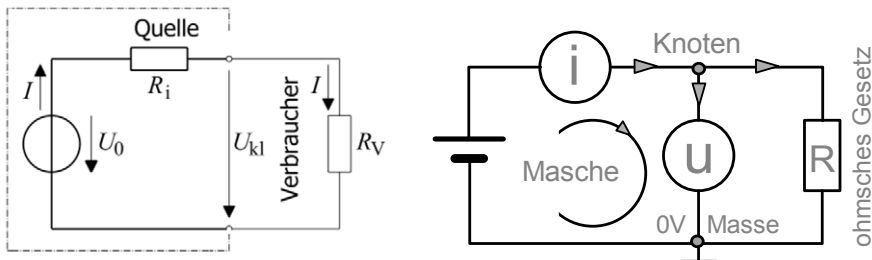


Abb. 2-1 Die Gesetze von Ohm und Kirchhoff: Die positiven Zählrichtungen für Spannungen und Ströme müssen noch durch Zählpfeile festgelegt werden. Sie sollten so gewählt werden, dass in Rechnungen möglichst wenige Minuszeichen erscheinen.

- die sog. **Maschen- und Knoten-Regeln von Kirchhoff** (die tatsächlich Gesetze sind) zur Berechnung von Strom- und Spannungsverteilungen in elektrischen Stromkreisen

In einem **Stromknoten** ist $\Sigma(i) = 0$

Das bedeutet, dass in einer **Verbindungsstelle (Knoten)** zu jedem Zeitpunkt die Summe aller zufließenden Ströme gleich der Summe aller abfließenden Ströme ist. Das ist die Folge der Inkompressibilität des elektrischen Stroms (Flüssigkeitsmodell).

In einer **Spannungsmasche** ist $\Sigma(u) = 0$

Das bedeutet, dass in einem **Stromkreis** die Summe der Verbraucherspannungen gleich der Summe der Erzeugerspannungen ist.

Die Kirchhoff'schen Gesetze gelten für alle Systeme, das ohmsche Gesetz gilt nur für lineare Systeme.

2.1.1 Elektrische Zweipole

Abb. 2-2: Zweipole haben genau einen Eingang und einen Ausgang. Das ist der einfachste Fall einer Signalverarbeitung. In den meisten Fällen ist der lineare Zweipol eine Idealisierung. In kritischen Fällen ist zu prüfen, ob sie zulässig ist.

Lineare Widerstände bezeichnet man zu Ehren ihres Entdeckers als ‚ohmsch‘. Georg Simon Ohm fand Anfang des 19. Jahrhunderts als erster das Gesetz der laminaren (wirbelfreien) Strömung ($u.R = R \cdot i.R$) in linearen elektrischen Stromkreisen.

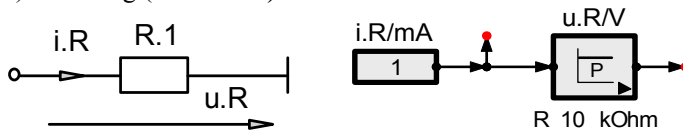


Abb. 2-2 Der ohmsche Widerstand $R = u.R / i.R$ als Schaltzeichen und als Struktur für Stromsteuerung

2.1.2 Spannungs- und Stromquellen

In der Elektrotechnik verwendet man konstante **Spannungsquellen** und **Stromquellen** zur Versorgung der Verbraucher (Abb. 2-3).

In der Elektronik arbeitet man mit Verstärkern, die als **steuerbare Spannungs- oder Stromquellen** dienen.

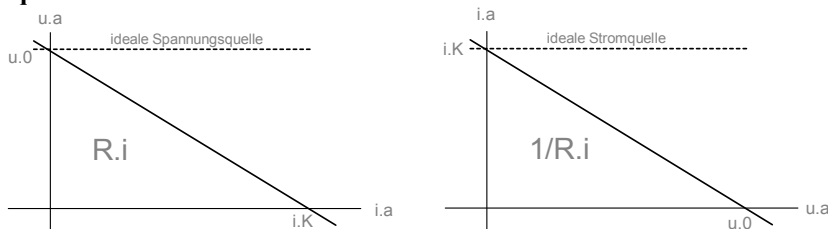


Abb. 2-3 Belastungskennlinie einer realen Spannungs- und Stromquelle

Daher muss auch für Simulationen bekannt sein, was unter Spannungs- und Stromquellen zu verstehen ist und in welchen Fällen man eine Quelle elektrischer Leistung als Spannungs- oder als Stromquelle auffassen soll.

Der Innenwiderstand R_i

Spannungsquellen unterscheiden sich durch die Art der Spannung (Gleich-, Wechsel-, gemischt), ihre Größe und ihr Leistungsvermögen, das sich durch einen Innenwiderstand R_i charakterisieren lässt. Bei schwachen Quellen bestimmt man R_i , indem man die Leerlaufspannung u_0 und den Kurzschlussstrom i_K misst und ins Verhältnis setzt:

$$R_i = u_0 / i_K.$$

R_i lässt sich auch für den Fall bestimmen, bei dem ein Kurzschluss unzulässig ist: Dazu wird die Quelle mit einem zulässigen Δi_a belastet und Δu_a dazu gemessen.

$$R_i = -\Delta u_a / \Delta i_a \text{ (Einheit ist } \Omega = V/A \text{)}.$$

Bei positivem R_i (der Normalfall) ist Δu_a negativ. Dann ist $-\Delta u_a$ positiv. In der Struktur der Ersatzspannungsquelle berücksichtigt man die Invertierung an der Summierstelle.

Bei **idealen Spannungsquellen** u_0 (egal ob für Gleich- oder Wechselstrom) ist die Klemmenspannung u_a unabhängig von der **Belastung** i_a . Ihr **Kurzschlussstrom** i_K geht gegen unendlich.

Wie die Kennlinien der Abb. 2-3 zeigen, sind beide elektrisch gleichwertig. Wie die Berechnung der Leerlauf- und Kurzschlussverluste zeigt, sind sie physikalisch jedoch sehr unterschiedlich:

1. Bei realen Spannungsquellen sinkt die Klemmenspannung mit der Belastung.
2. Bei realen Stromquellen steigt die Klemmenspannung mit dem Lastwiderstand.

Ersatzspannungsquelle

Bei **realen Spannungsquellen** erzeugt der Ausgangsstrom einen inneren Spannungsabfall an einem seriellen **Innenwiderstand** R_i (Abb. 2-4).

R_i ist der Grund dafür, dass die Ausgangsspannung u_a bei Belastung gegenüber der Leerlaufspannung u_0 absinkt. Die Leerlaufverluste sind null, ihre Kurzschlussverluste maximal.

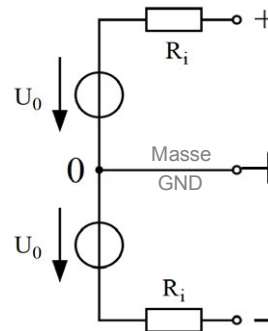


Abb. 2-4 Ersatzschaltung zweier realer Spannungsquellen für positive und negative Gleichspannungen

Beispiele für nahezu ideale Spannungsquellen: die Stromversorgung für Haushalte und Industrie mit Wechselstrom und die Autobatterie für Gleichstrom. Um bei Kurzschluss Schäden zu vermeiden, müssen Spannungsquellen abgesichert sein.

reale Spannungsquelle: $u_a = u_0 - R_i \cdot i_a$

Abb. 2-5 zeigt die Struktur zur Simulation einer realen Spannungsquelle:

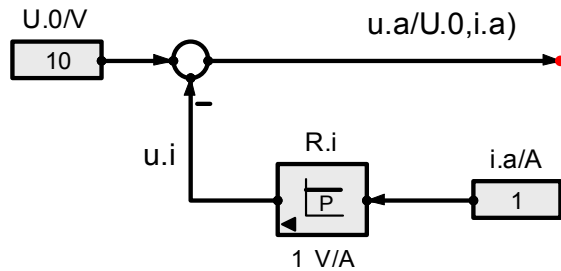
Ersatzspannungsquelle:

Abb. 2-5 Struktur einer Ersatzspannungsquelle: Neben der Form der Gleich- oder Wechselspannung sind zwei Daten kennzeichnend: die Leerlaufspannung $u.0$ und der Innenwiderstand $R.i$.

Spannungen und Potentiale:

- Spannungen werden immer zwischen zwei Punkten gemessen.
- Potentiale werden gegen ein vereinbartes Nullpotential, genannt Masse oder 0V, gemessen. Das vereinfacht die Beschreibung elektrischer Schaltungen.

Zur Einführung in die Strukturbildung und Simulation hat der Autor sich für elektrische Beispiele entschieden, denn elektrische Größen sind relativ leicht zu messen. Die Darstellung der Signale erfolgt im Zeitbereich. Dafür gibt es folgende Gründe:

- die einfache und schnelle Realisierbarkeit und
- die anschauliche Signaldarstellung, wie mit dem Oszilloskop gemessen.

Als Bauelemente verwenden wir Widerstände, Kondensatoren und Dioden (Abb. 2-20). Wir werden sie hier in Kürze erklären, soweit das Verständnis der folgenden Simulationen dies erfordert.

Die Ersatzstromquelle

Bei **idealen Stromquellen** ist der Ausgangsstrom $i.a$ unabhängig von der Klemmenspannung $u.a$ (Abb. 2-6). Bei offenen Klemmen geht $u.a$ gegen unendlich. Bei realen Stromquellen erzeugt ihr Innenwiderstand $R.i$ die Ausgangsleerlaufspannung $u.0$.

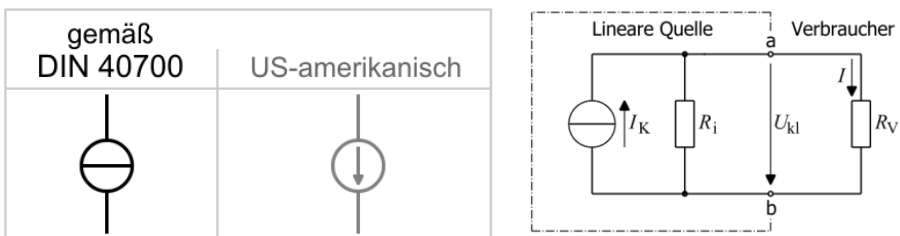


Abb. 2-6 Symbole und Ersatzschaltung einer realen elektrischen Stromquelle: Abb. 2-7 zeigt ihre Struktur.

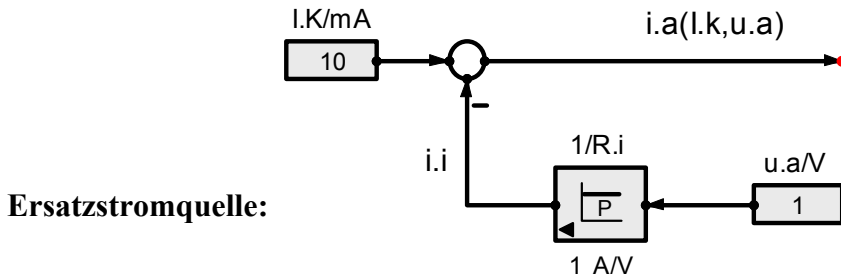


Abb. 2-7 Struktur einer Ersatzstromquelle: Neben der Form des Stroms (Gleich-, Wechsel-) sind zwei Daten kennzeichnend: der Kurzschlussstrom $i.K$ und der Innenwiderstand $R.i$.

Bei der **realen Stromquelle** wird der Strom durch den parallelen Innenwiderstand $R.i$ bei steigender Ausgangsspannung immer größer (Abb. 2-3). Entsprechend kleiner wird der Ausgangsstrom. Die inneren Verluste sind bei Kurzschluss null und steigen mit $u.a$. Ein typisches Beispiel für steuerbare Stromquellen sind Transistoren (Kap. 8 **Elektronik**). Um im Leerlauf Schäden zu vermeiden, besitzen Stromquellen eine Spannungsbegrenzung.

$$\text{reale Stromquelle:} \quad i.a = i.K - u.a / R.i$$

Ersatzstrom- oder -spannungsquelle?

- Wenn der Lastwiderstand $R.L \gg R.i$ ist, ist $u.a \approx u.0$. Dann sollte die Darstellung als Ersatzspannungsquelle gewählt werden.
- Wenn der Lastwiderstand $R.L \ll R.i$ ist, ist $i.a \approx i.K$. Dann sollte die Darstellung als Ersatzstromquelle gewählt werden.

Das **Kriterium** zur Unterscheidung von Spannungs- und Stromquellen ist das **Verhältnis von Innenwiderstand $R.i$ und Lastwiderstand $R.L$:**

- Ist $R.i \ll R.L$, so ist die Beschreibung als Spannungsquelle sinnvoll.
- Ist $R.i \gg R.L$, so ist die Darstellung als Stromquelle angebracht.
- Bei $R.L = R.i$ ist die Leistungsabgabe Maximal (Leistungsanpassung). Dieser Fall ist insbesondere bei Sensoren wichtig, da ihre Leistungsabgabe minimal ist. Sensoren behandelt der Bd. 6/7 in Kap. 10.

Die Umrechnung der Quellen erfolgt über den Ersatzinnenwiderstand $R.i$:

$$\text{Gl. 2-1} \quad \text{Strom- in Spannungsquelle:} \quad u.0 = R.i \cdot i.K$$

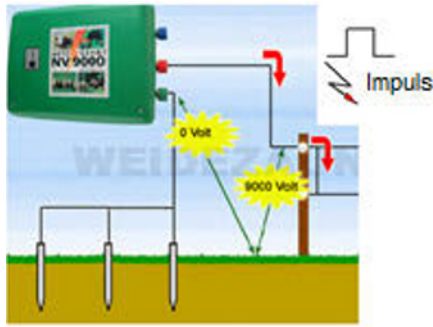
$$\text{Gl. 2-2} \quad \text{Spannungs- in Stromquelle:} \quad i.K = u.0 / R.i$$

Beispiel: 300V aus dem Stromversorgungsnetz

Abb. 2-140 zeigt die Schaltung einer Gleichspannungsquelle für 300V, die aus der gefährlichen Netzspannung (eff. 230V, max 325V) gespeist wird. Durch $M\Omega$ -Widerstände wird sie eigentlich zur ungefährlichen Stromquelle. Da sie aber unbelastet betrieben werden soll, kann sie als Spannungsquelle aufgefasst werden

Beispiel 1: Elektrozaun

Elektrozäune (Abb. 2-8) erzeugen **gepulste Hochspannungen** über hohe Innenwiderstände. Die hohe Berührungsspannung erzeugt einen ungefährlichen Schreck. Der geringe Kurzschlussstrom macht sie ungefährlich für Mensch und Tier. Berechnet werden soll die Ersatzschaltung eines Weidezaun-Netzgeräts.



Quelle: <http://www.weidezaun.info>

Abb. 2-8 Elektrischer Weidezaun: Die Spannung kann bis zu 10kV betragen. Der Strom ist höchstens einige mA. Das erzeugt großen Schreck, ist aber völlig ungefährlich. Abb. 2-9 zeigt die technischen Daten eines Weidezaungeräts.

Große Leerlaufspannung und großer Innenwiderstand ergeben bei Belastung eine Stromquelle (Abb. 2-9).

**Weidezaungerät Netzgerät
NV 9000 230V**

Technische Daten:

Stromquelle	230V~
Ausgangsspannung	max.: 10000 Volt (Leerlauf)
Spannung bei 500 kOhm	ca. 4900 Volt
Stromverbrauch	10 Watt
Ladeenergie	12,5 Joule
Entladeenergie	9,5 Joule
max. Zaunlänge: ohne Bewuchs	70 km
leichter Bewuchs	20 km
starker Bewuchs	8 km
Maße des Gerätes BxHxT	270mm x 220mm x 95mm
empf. Anzahl Erdungsstäbe	mindestens 3 Stck.

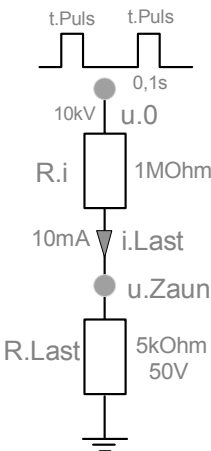


Abb. 2-9 Elektrozäune erzeugen alle 1,3s für etwa 0,1s Stromimpulse mit Anfangsspannungen bis zu 9000V=9kV, die bei Berührung auf einige 10Volt zusammenbrechen.

In den Herstellerangaben des Weidezaun-Netzgeräts (Abb. 2-9) fehlen der Innenwiderstand R_i , der Kurzschlussstrom i_K und die Impulsdauer t_{Puls} . Nachfolgend werden sie berechnet.

Innenwiderstand und Kurzschlussstrom einer Weidezaunquelle

Herstellerangabe ist ca. 5kV an 500k Ω $\rightarrow$ i.Last=10mA.

Zu 5kV und 10mA gehört der Innenwiderstand $R_i=1M\Omega$.

Die Impulsdauer der Weidezaunquelle

Herstellerangabe ist die Impulsenergie $W_{\text{Puls}}=u_0 \cdot i_K \cdot t_{\text{Puls}}$.

Daraus folgt die Impulsdauer $t_{\text{Puls}}=W_{\text{Puls}}/(u_0 \cdot i_K)$.

Mit $W_{\text{Puls}}=10\text{Joule}$ ($=Ws$), $u_0=10kV$ und $i_K=10mA$ wird $t_{\text{Puls}}=0,1s$.

Beispiel 2: elektrische Stromversorgung

Stromversorgungsnetze führen **stabilisierte Spannungen** (Abb. 2-10). Die Stabilisierung bei wechselnder Belastung erfolgt durch **Stromeinspeisung** über Transformatoren (Bd. 4/7, Kap. 9) aus Generatoren (Bd. 4/7, Kap 6).

Höchstspannungen:

220kV bis 380kV

Hochspannung: 110kV

Mittelspannung:

10kV bis 20kV

Kleinspannungen:

Drehstrom 400V; 230V/Phase

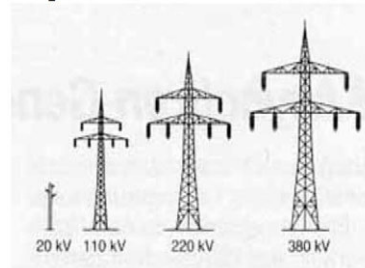


Abb. 2-10 Spannungsdefinitionen

In Bd. 2/7 vertiefen wir das Thema ‚Stromversorgung‘ beim Thema HGÜ (Hochspannungs-Gleichstrom-Übertagung).

2.1.3 Netzteile

Elektrische und elektronische Schaltungen der Nachrichten und Digitaltechnik werden meist mit Gleichspannungen betrieben:

- 5V für Digitalschaltungen
- +12V und -12V für Analogschaltungen
- 24V für Speicher-Programmierbare-Steuerungen

Analoge Netzteile (Abb. 2-11) bestehen aus Trafo (Umspanner), Gleichrichter mit Glättung und optionalem **Spannungsregler**. Deren Simulation finden Sie in Kap. 8 Elektronik.

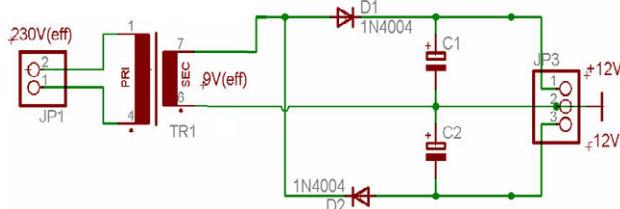


Abb. 2-11 Analoges Netzteil mit symmetrischen Ausgangsspannungen durch zwei Einweggleichrichter mit Glättung durch die Ladekondensatoren C1 und C2 (Elektrolytkondensatoren)

Unstabilisierte Zweweggleichrichtung

Abb. 2-12 zeigt die Spannungen und Ströme eines analogen Netzteils mit Zweweggleichrichtung bei Belastung. Wie man sie simuliert, wird anschließend erklärt.

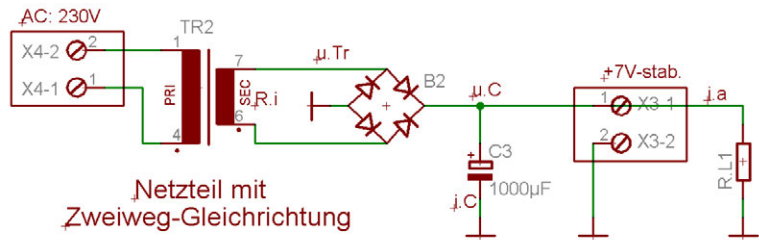


Abb. 2-12 Unstabilisiertes analoges Netzteil mit Brückengleichrichter: Abb. 2-13 zeigt den Spannungsverlauf bei Belastung.

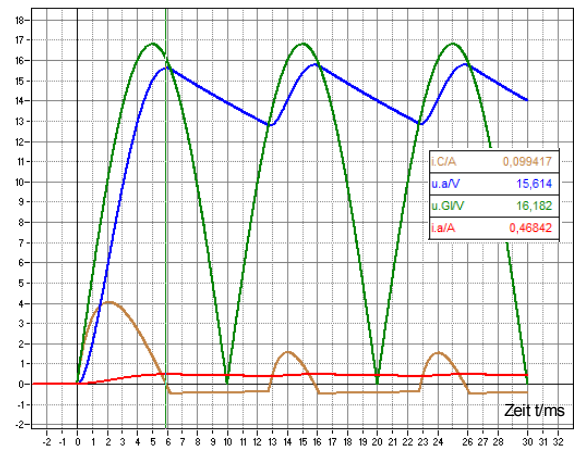


Abb. 2-13 Simulierte Spannungen und Ströme einer Zweweggleichrichtung

Die Struktur des Zweweggleichrichters mit Ladekondensator

Die Struktur der Abb. 2-14 zeigt die Simulation des oben gezeigten, unstabilisierten Netzteils mit Zweweggleichrichter:

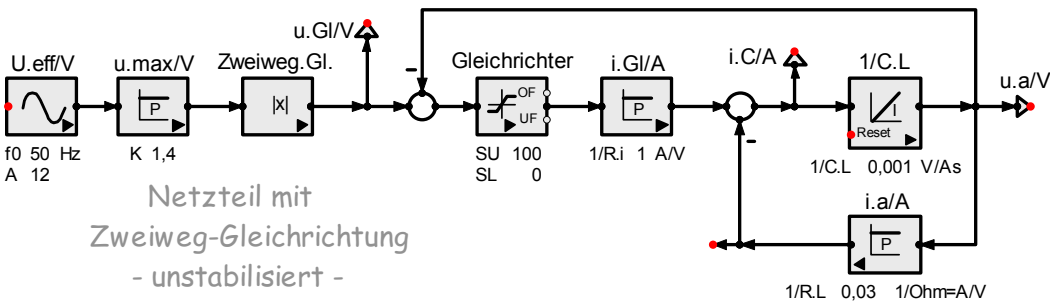


Abb. 2-14 Simulation eines Netzteils mit Zweweggleichrichter: Die Erklärung folgt im Text.

- Der erste Teil von Abb. 2-14 zeigt die Gleichrichtung der Eingangsspannung durch Betragsbildung.
- Der mittlere Teil berechnet den Gleichrichterstrom aus dem inneren Spannungsabfall im Trafo aus dem Innenwiderstand R_i (hier 1Ω) und der über ihm abfallenden, inneren Spannung u_{Gl} .
- Zuletzt wird die Ausgangsspannung u_a aus der Integration des Kondensatorstroms $i_C = i_{Gl} - i_a$ berechnet.

Der Brückengleichrichter

Brückengleichrichter dienen zur Zweiweggleichrichtung von Wechselströmen. Sie erfordern potentialfreie Eingangsspannungen, wie sie von Transformatoren zur Verfügung gestellt werden. Transformatoren behandeln wir in Bd. 4/7, Kap. 7.

Soweit es das Verständnis von Gleichrichterschaltungen erfordert, erfahren Sie die Funktion des Brückengleichrichters im folgenden Abschnitt.

Abb. 2-22 zeigt eine Diodenkennlinie. Einzelheiten zu **Dioden**, aus denen Brückengleichrichter aufgebaut sind, finden Sie in Kap. 8 **Elektronik**.

Hier interessiert zunächst einmal die zu erwartende Verlustleistung des Brückengleichrichters, denn die bestimmt die Größe des eventuell erforderlichen Kühlkörpers.

Die Simulation der Zweiweggleichrichtung erfordert zweierlei:

1. die Betragsbildung der Eingangsspannung: Dazu dient der Block ‚Zueiweg-Gl.‘
2. die Verhinderung negativer Ströme: Das bewirkt der Kennlinienblock ‚Gleichrichter‘

Die RC- Glättung

Damit die Glättung funktioniert, muss ihre **Zeitkonstante** $T_{Gl} = C_{Gl} \cdot R_{Gl}$ groß gegen die Periode der Zweiweg-gleichgerichteten Wechselspannung sein (10ms bei 50Hz). Wenn ein nachgeschalteter Messverstärker keinen Eingangsstrom zieht (Abb. 2-67), kann R_{Gl} hochohmig sein, z.B. $1M\Omega$. Für $T_{Gl} = 1s$ muss dann $C_{Gl} = 1\mu F$ sein (Elko). Kondensatoren und Elkos sind das Thema des Kapitels 2.4.

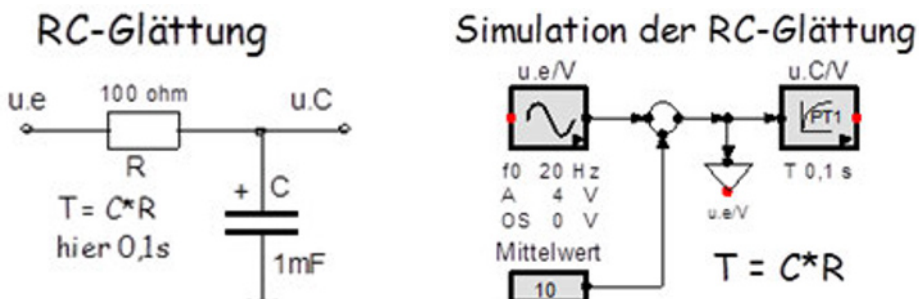


Abb. 2-15 RC-Glättung einer Eingangsspannung durch ein RC-Glied: Die Simulation erfolgt durch eine Verzögerung mit der Zeitkonstante T . Das Symbol des Testoszillators stellt nur den Wechselanteil des Signals (hier 4V) dar, nicht den Offset, der hier 10V beträgt.

Über der Gleichrichterbrücke (Abb. 2-12) fallen bei einem benötigten Nennstrom von 8A fast 2V ab. Die Verlustleistung von fast 16W erfordert einen Kühlkörper mit einem thermischen Widerstand von **weniger als 3K/W**. Einzelheiten zur **Kühlkörperberechnung** erfahren Sie in Bd. 7/7, **Kap. 13 Wärmetechnik**.

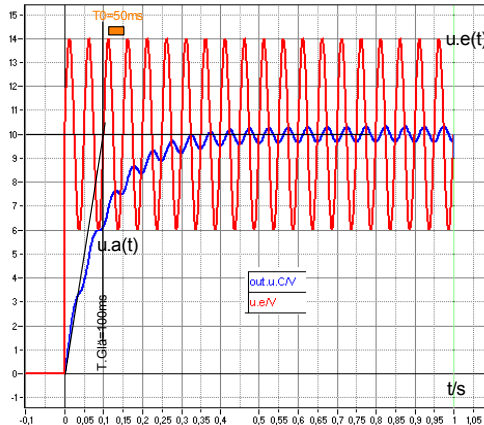


Abb. 2-16 RC-Glättung zur Mittelwertbildung, simuliert durch eine Verzögerung

Zu Abb. 2-16:

Blau: Eingangsspannung u_e mit einem Mittelwert von 10V, überlagert von einer Sinusschwingung mit einer Amplitude von 3V und einer Periode von 40ms

Rot: die geglättete Ausgangsspannung: Zu erkennen ist die Zeitkonstante T_{Gl} der Verzögerung und die Restwelligkeit mit der Eingangsperiode.

Beispiel für eine Verzögerung: Die RC-Glättung

In der Elektronik wird die Mittelwertbildung meist durch Schaltungen aus Kondensatoren C (Speicher) und Widerständen R (Verbraucher) realisiert (Abb. 2-15). RC-Glieder mitteln Spannungen, indem der Kondensator C seine Ladung über die Zeit verteilt.

Widerstände R und **Kondensatoren C** sind die in der Elektrotechnik und Elektronik am häufigsten eingesetzten Bauelemente zur Mittelwertbildung, auch Glättung genannt. Der Grund ist die große Speicherdichte gepolter Kondensatoren (Elektrolytkondensatoren = Elkos). Damit lassen sich große Zeitkonstanten T auf kleinem Raum realisieren.

Der Ladekondensator C.L

Zum ersten Verständnis der RC-Glättung sei bereits dies erwähnt: Kondensatoren C speichern elektrische **Ladungen q (in As)**, die man an ihrer proportionalen Klemmenspannung u_C erkennt:

$$\text{Gl. 2-3 Kondensatorspannung} \quad u_C = q/C.$$

Daher ist die **Kapazitätseinheit das Farad: $F = 1\text{As/V}$** .

Gebräuchliche Untereinheiten sind $\text{mF} = F/1000$ und das $\mu\text{F} = \text{mF}/1000$.

Baugröße $\sim C \cdot u$, ca. $60\text{mm}^3/(\mu\text{F} \cdot \text{V})$.

Strukturbildung und Simulation technischer Systeme

Band 1

Die statischen Grundlagen der Simulation

Rossmann, A.

2016, XVIII, 343 S. 363 Abb., 75 Abb. in Farbe.,

Softcover

ISBN: 978-3-662-46765-7