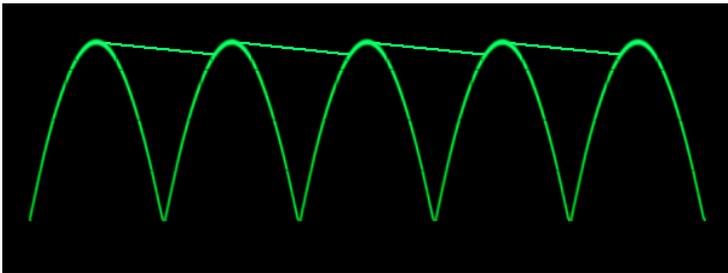
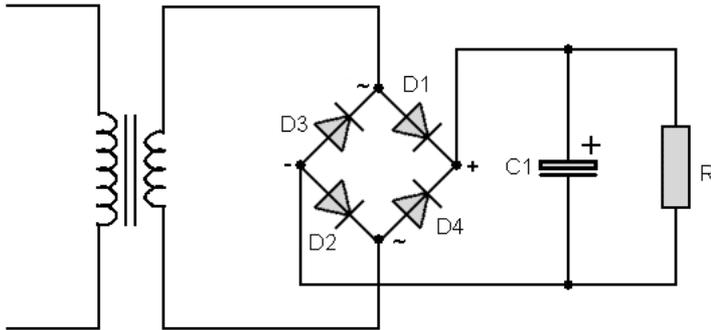


Mi. 10./17 April. 2013  
Workshop im OV Weinheim

# Wie funktioniert ein Netzteil?

## Ein virtuelles Bauprojekt mit LTspice

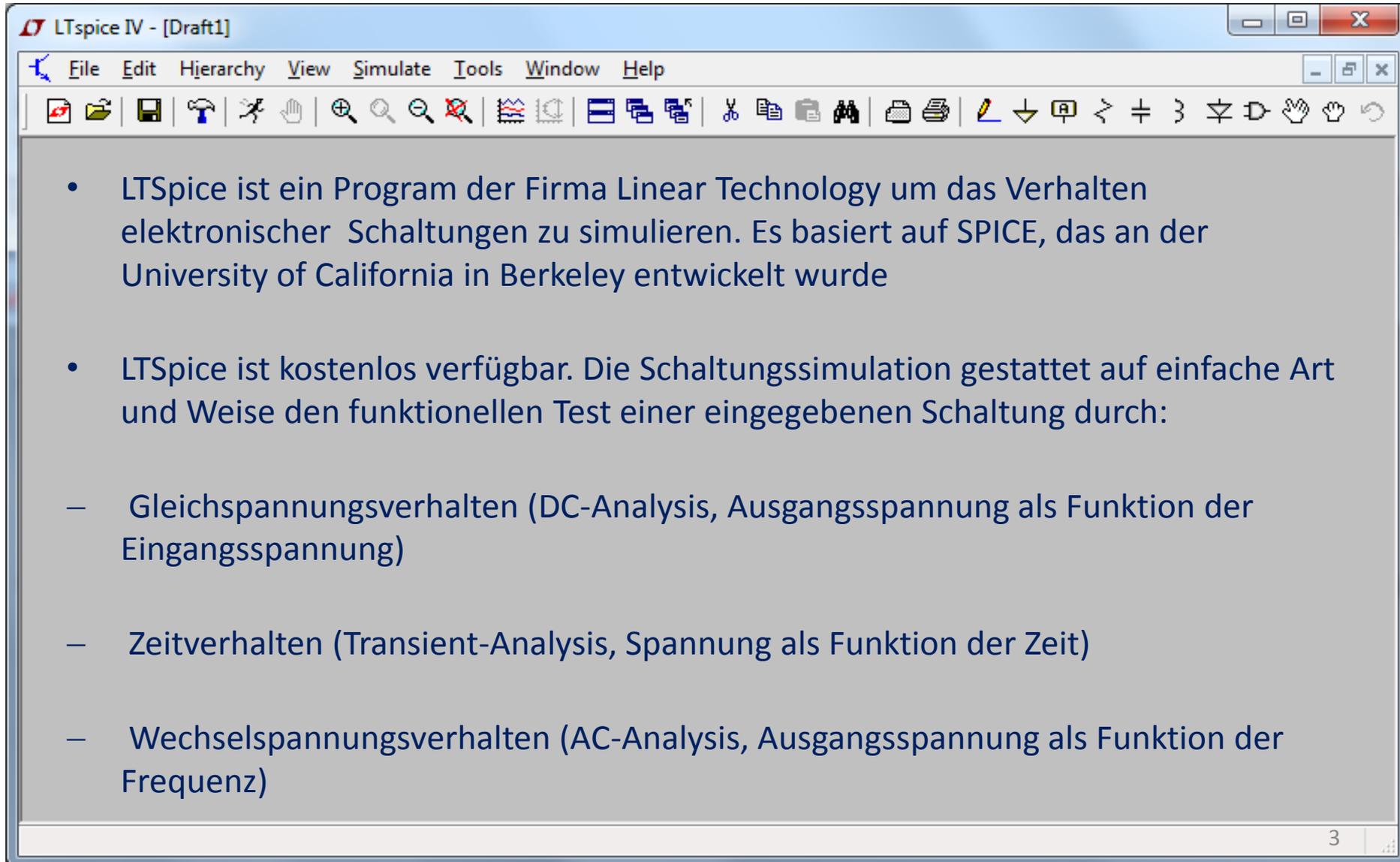


# „Ohne LötKolben“

Ziel des Workshops:

- Wir beschäftigen uns mit den Grundlagen von Trafo, Gleichrichterdiode, Siebung und Spannungsstabilisierung mit Zenerdiode und Transistor.
- Erfahren den Unterschied zwischen einem längsgeregeltem linearen Netzteil und einem Schaltnetzteil
- Wir benutzen dazu das Freeware Schaltungssimulations-Tool LTSpice und erkennen die Möglichkeiten, die eine Spice Simulation bietet.

# Schaltungssimulation mit LTspice



The image shows a screenshot of the LTspice IV software window. The title bar reads "LTspice IV - [Draft1]". The menu bar includes "File", "Edit", "Hierarchy", "View", "Simulate", "Tools", "Window", and "Help". The toolbar contains various icons for file operations, simulation, and editing. The main workspace displays a presentation slide with the following content:

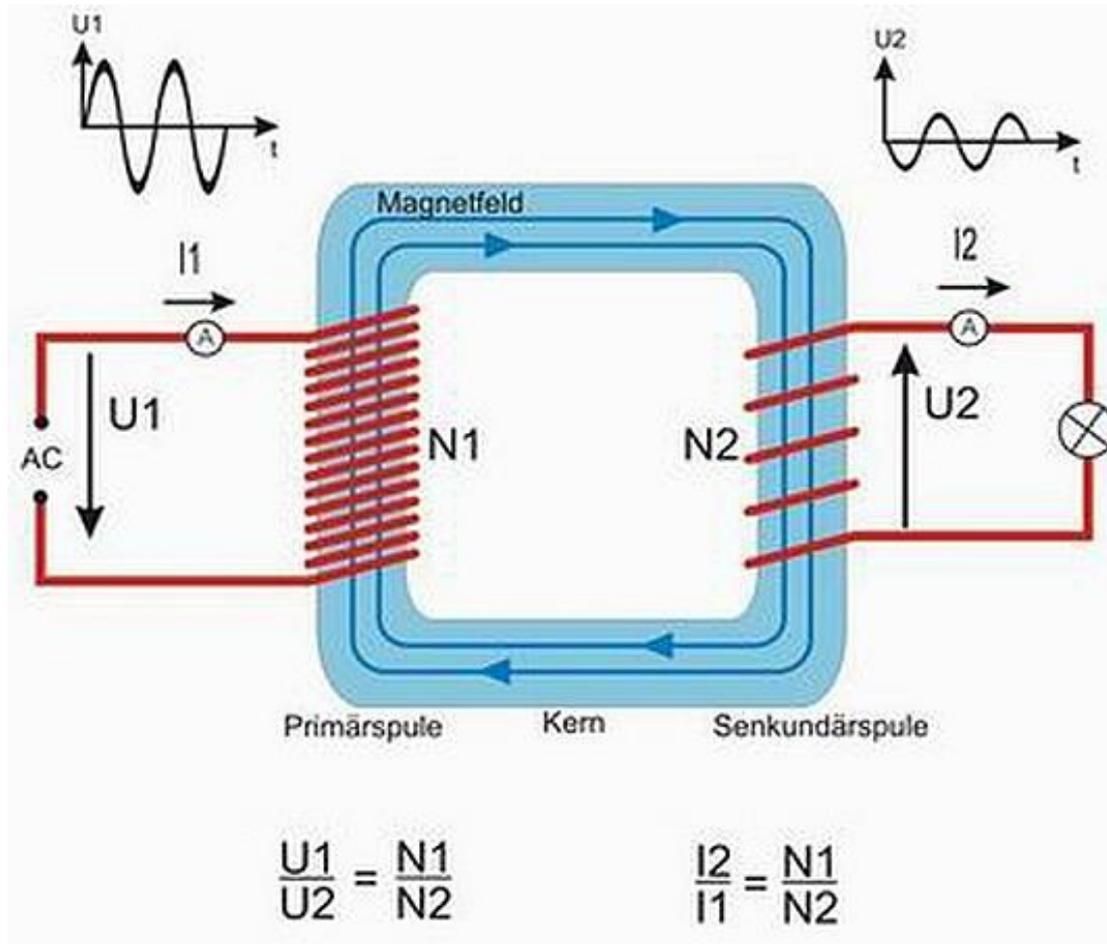
- LTSpice ist ein Program der Firma Linear Technology um das Verhalten elektronischer Schaltungen zu simulieren. Es basiert auf SPICE, das an der University of California in Berkeley entwickelt wurde
- LTSpice ist kostenlos verfügbar. Die Schaltungssimulation gestattet auf einfache Art und Weise den funktionellen Test einer eingegebenen Schaltung durch:
  - Gleichspannungsverhalten (DC-Analysis, Ausgangsspannung als Funktion der Eingangsspannung)
  - Zeitverhalten (Transient-Analysis, Spannung als Funktion der Zeit)
  - Wechselspannungsverhalten (AC-Analysis, Ausgangsspannung als Funktion der Frequenz)

The slide number "3" is visible in the bottom right corner of the window.

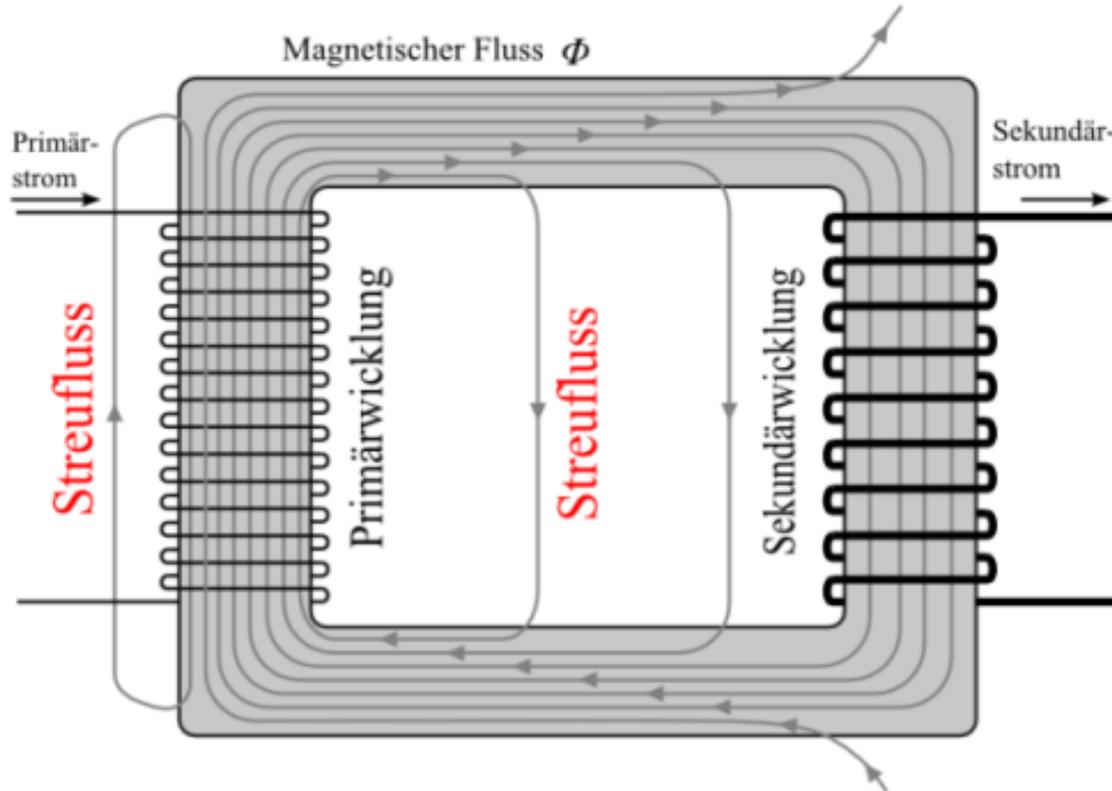
# LTspice Funktion und Bedienung

- Zugegeben, die Bedienung ist nicht gerade kinderleicht, denn es handelt sich um eine bunte Mischung von Menüs, Funktionstasten und Kommandozeilen-Eingaben.
- Aber wenn man den Dreh heraus hat, läuft es prima. Es ist wie in einer guten Ehe: Viele Eigenschaften schätzt man, aber ebenso muss man Einiges in Liebe hinnehmen... (G. Kraus)
- Dafür können neue Ideen „ohne Lötkolben“ bis ins Detail hinein ausgetestet werden.
- Nicht nur für Profis, auch für Hobbyelektroniker und Funkamateure eröffnen sich viele kreative Möglichkeiten.
- LT-Spice simuliert komplexeste Schaltungen, eignet sich aber auch hervorragend zur Ausbildung, um einfache Grundschaltungen zu untersuchen und besser zu verstehen.

# Transformator mit Eisenkern

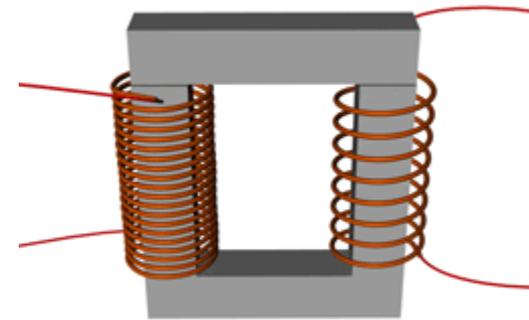


# Streufloss - Koppelfaktor

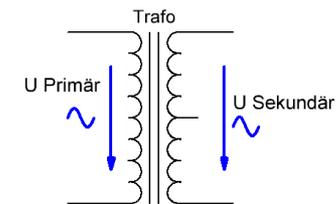


# Transformator - Grundlegendes

Mit einem Trafo werden Wechselspannungen herauf- oder herunter-transformiert. Der Trafo besteht im Prinzip aus magnetisch gekoppelten Spulen, mit gleicher oder unterschiedlicher Windungszahl, die auf einen Kern aus Eisen oder Ferrit gewickelt sind.



In der Eingangswicklung (Primärseite) wird ein sich änderndes Magnetfeld durch die anliegende Wechselspannung erzeugt. In der Ausgangswicklung (Sekundärseite) induziert dieses Magnetfeld wiederum eine Spannung.



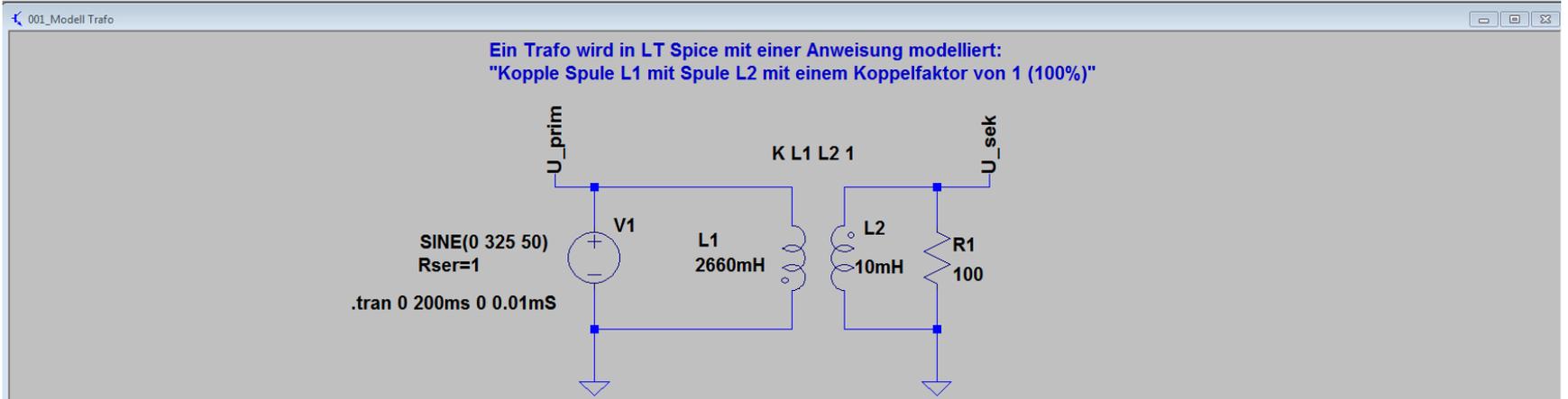
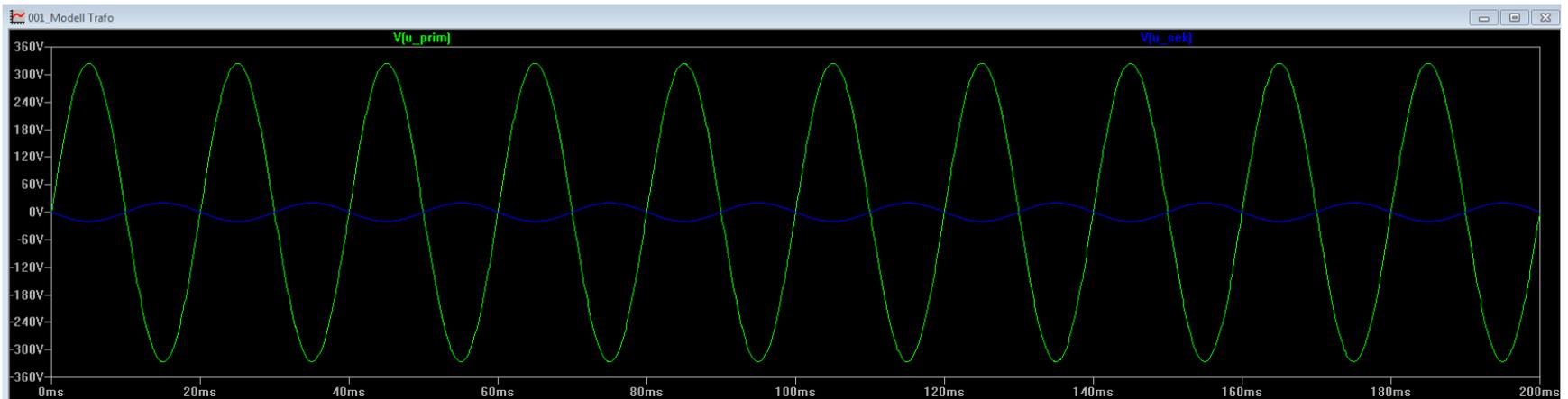
Schaltsymbol eines Trafo

Die Höhe der transformierten Spannung ist proportional abhängig vom Windungsverhältnis  $N_1/N_2$  der Primär- und Sekundärwicklung des Transformators. Der Strom wird umgekehrt proportional zum Wicklungsverhältnis transformiert.

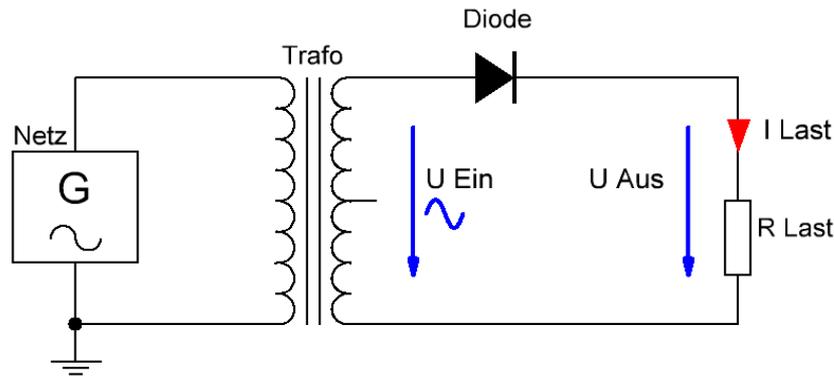
Da die Induktivität einer Spule quadratisch mit ihrer Windungszahl steigt, transformiert ein Trafo folglich proportional zur Quadratwurzel des Verhältnisses der Induktivität seiner Wicklungen.

Beispiel : Windungsverhältnis 3:1 entspricht einem Induktivitätsverhältnis 9:1

# Trafomodell in LTspice



# Einweg-Gleichrichterschaltung

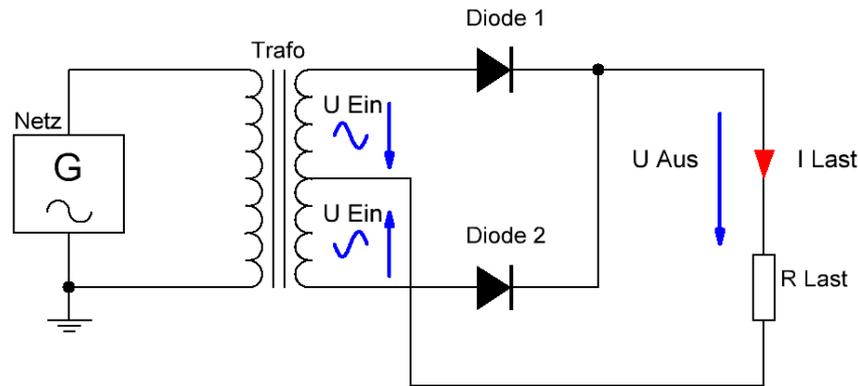


Die Einweg-Gleichrichterschaltung besteht aus einer einfachen Diode. Die Polung der Diode bestimmt, ob eine positive oder eine negative Spannung  $U_{\text{aus}}$  am Lastwiderstand anliegt.

Dadurch, dass die Halbleiterdiode den Strom nur in einer Richtung durchlässt, sperrt sie die entgegengesetzt polarisierte zweite Wechselstrom Halbwelle.

Am Ausgang der Einweg-Gleichrichterschaltung entsteht eine pulsierende Gleichspannung. Da der Strom nur in eine Richtung durch die Diode fließt, fehlt die jeweils zweite Halbwelle der Wechselspannung am Ausgang.

# Zweiweg-Gleichrichterschaltung



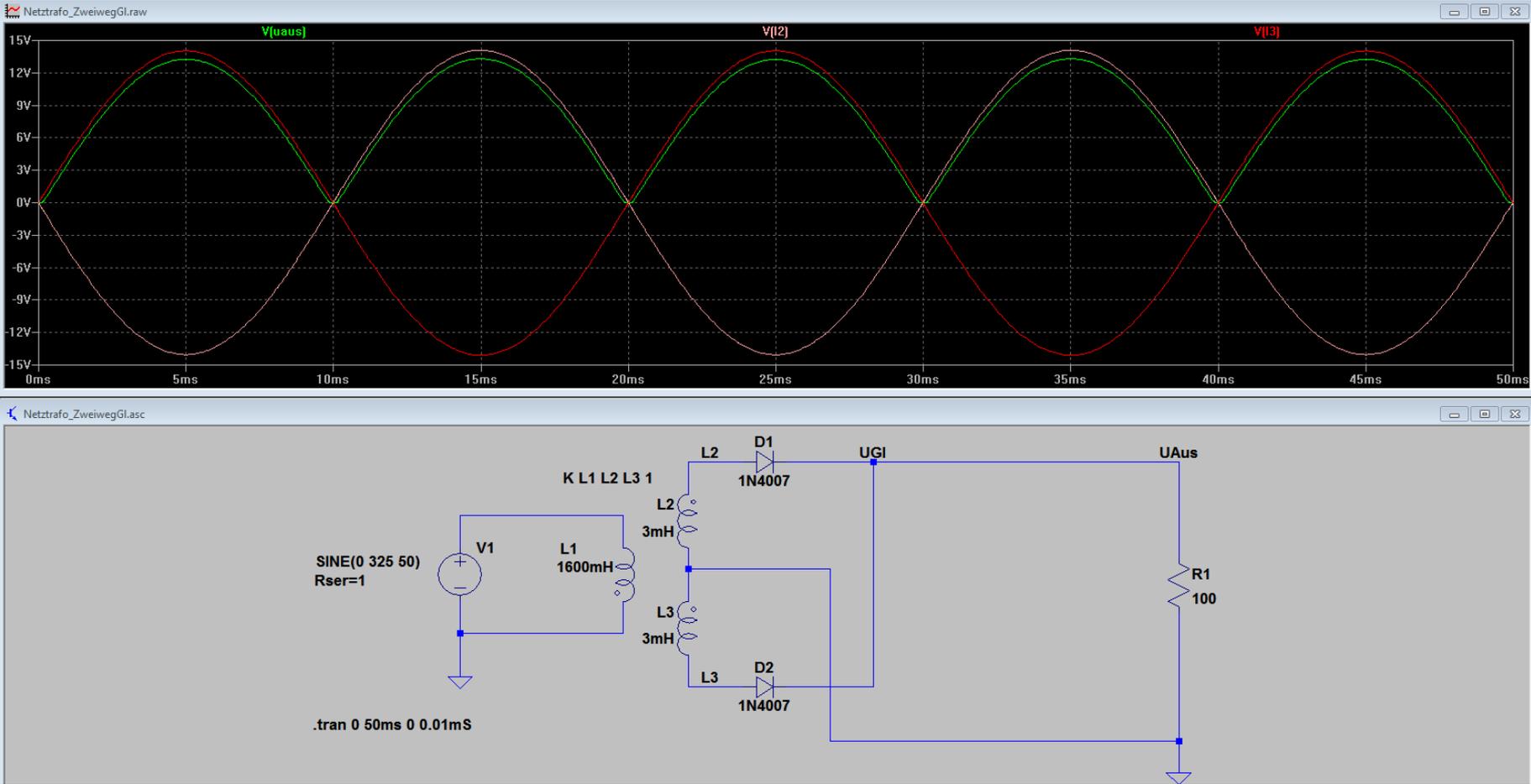
Die Mittelpunkt-Zweiweg-Gleichrichterschaltung setzt einen Trafo mit einer Mittelanzapfung voraus, in den der Strom zurückfließen kann.

Durch die beiden Dioden wird der Strom der beiden Halbwellen der Eingangsspannung  $U_{\text{ein}}$  über einen Punkt der Schaltung geführt. Auf einer gemeinsamen Leitung werden die Ströme zum Trafo zurückgeführt.

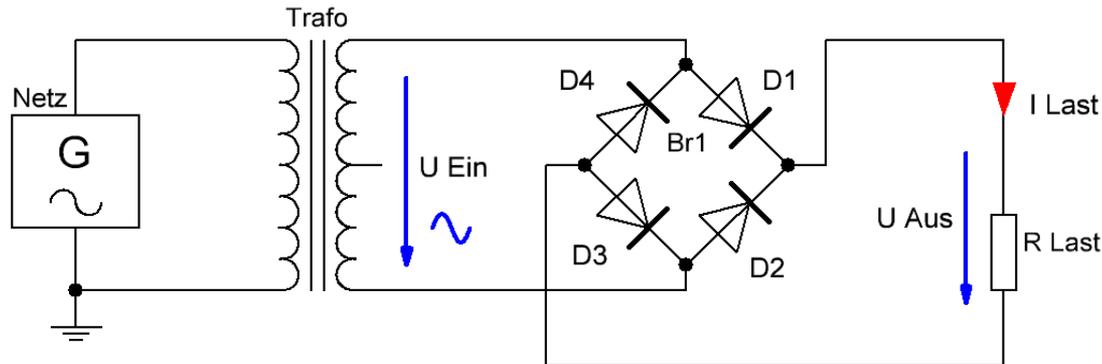
Der Stromfluss in der positiven Halbwelle fließt durch die Diode  $D_1$  über den Widerstand zur Mittelanzapfung des Trafos, die Diode  $D_2$  sperrt.

Der Stromfluss der negativen Halbwelle wird durch die Diode  $D_2$  zum Verbraucherwiderstand geführt, die Diode  $D_1$  sperrt. Es werden beide Halbwellen ausgenutzt.

# Simulation Zweiweg Gleichrichter



# Brücken-Gleichrichterschaltung

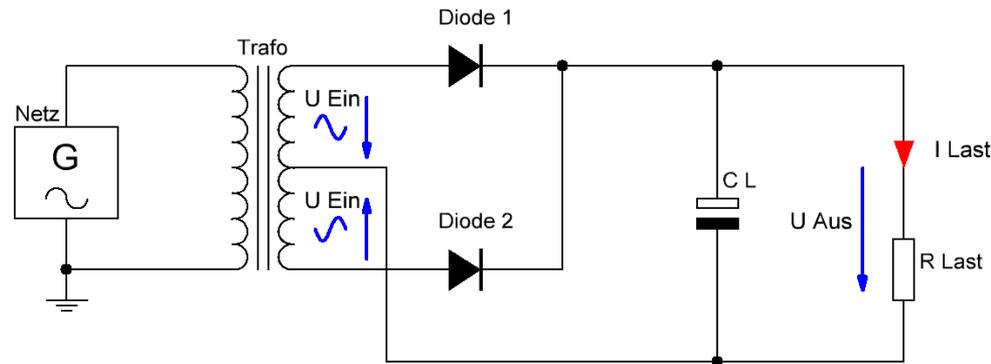


Die Brücken-Gleichrichterschaltung besteht aus zwei Diodenpaaren. Durch die Anordnung der Dioden in der Schaltung fließt der Wechselstrom je nach Halbwelle über zwei verschiedene Wege zum Lastwiderstand, so dass der Verbraucher immer in der gleichen Polarität vom Strom durchflossen wird.

Der Stromfluss in der positiven Halbwelle fließt durch die Diode  $D_1$  über den Lastwiderstand und dann weiter über  $D_3$  zurück zum Trafo. Bei der negativen Halbwelle fließt der Strom durch die Diode  $D_2$  über die Last und dann weiter über  $D_4$  zurück zum Trafo.

Es werden beide Halbwellen ausgenutzt. Im Gegensatz zur Zweiweg-Gleichrichterschaltung wird dazu kein Trafo mit Mittelanzapfung benötigt.

# Glättung und Siebung



Durch die Gleichrichtung der Halbwellen des Wechselstroms entsteht eine stark pulsierende Gleichspannung. Elektrisch gesehen handelt es sich dabei um eine Gleichspannung, der eine Wechselspannung überlagert ist.

Zum Glätten der Gleichspannung wird ein Kondensator verwendet. Meistens ein Elektrolytkondensator mit einer hohen Kapazität. Der Kondensator wird als Ladekondensator  $C_L$  bezeichnet. Er wirkt als Energiespeicher. Während der Zeit des Anstiegs der Spannung lädt der Kondensator sich auf. Zwischen den Halbwellen überbrückt der Kondensator die Spannungslücke.

Elektrisch kann man die Funktion des Ladekondensators auch als Kurzschluss (Sieb) für die der Gleichspannung überlagerte Wechselspannung betrachten.

# Restwelligkeit - Brummspannung

Je größer die Kapazität des Kondensators ist, um so besser ist die Glättung. Die Kapazität kann aber nicht beliebig hoch gewählt werden, Innenwiderstand und Maximalstrom von Trafo und Dioden setzen Grenzen.

Der überlagerte Wechselspannungsanteil, die Restwelligkeit der geglätteten Wechselspannung wird auch Brummspannung genannt.

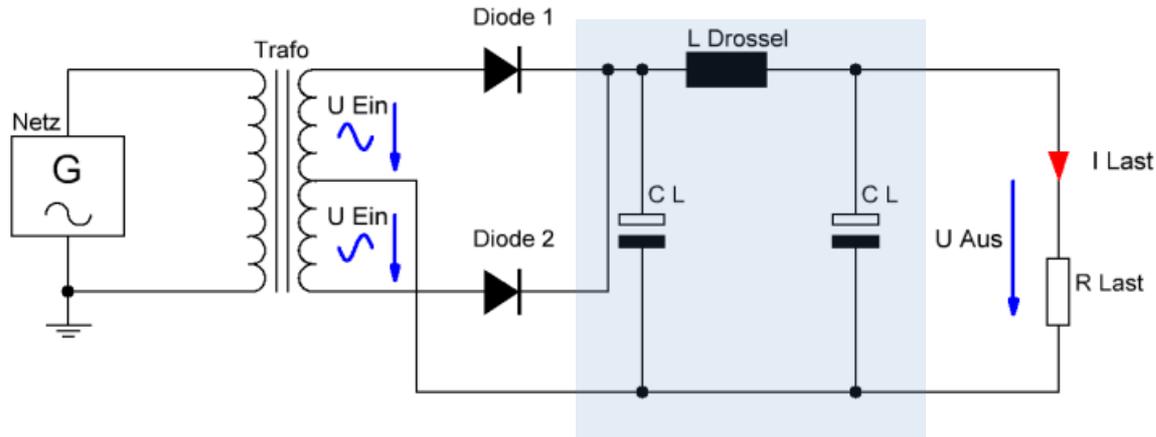
## **Die Restwelligkeit ist abhängig von**

- der Kapazität des Ladekondensators  $C_L$ .
- der Zeit (Frequenz) mit der der Ladekondensator aufgeladen wird.
- der Größe der Belastung/Stromentnahme.

## **Die Restwelligkeit ist um so kleiner, je**

- größer die Kapazität vom Ladekondensator  $C_L$  ist.
- größer der Lastwiderstand  $R_L$  / je kleiner der Laststrom  $I_L$  ist.
- höher die Frequenz der Brummspannung ist.

# Siebglied aus L und C



Überlagerte Wechselspannung kann mit einem Siebglied aus L und C noch weiter verringert werden. Kondensatoren und Drosselspule bilden dabei einen Tiefpass, der Gleichspannung durchlässt und die Wechselspannung dämpfen soll. In der Zeit der Röhrentechnik war dies eine gebräuchliche Methode. Heute benutzt man ähnliche Siebglieder mit Ferritdrosseln als Filter zur EMV Entstörung.

Sieb- und Filterschaltungen sollen die Brummspannung (Wechselspannungsanteil einer geglätteten Wechselspannung) möglichst stark verringern, ohne den Innenwiderstand der gesamten Schaltung zu erhöhen.

# Z-Diode



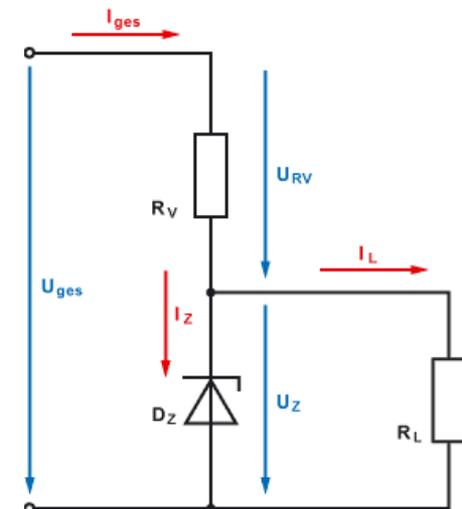
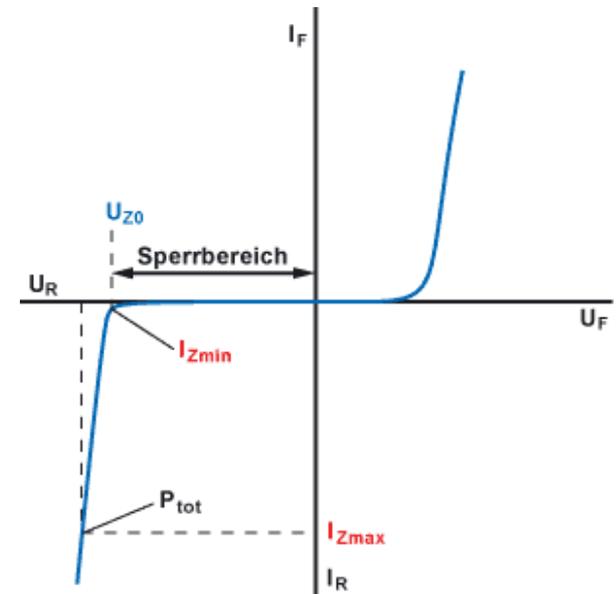
Die Z-Diode ist eine Silizium-Halbleiterdiode, die in Sperrrichtung betrieben wird. In Sperrrichtung tritt der Zener- bzw. der Lawinen-Effekt auf, bei dem ab einer bestimmten Spannung der Strom schlagartig zunimmt. In Durchlassrichtung arbeitet die Z-Diode wie eine normale Diode.

Z-Dioden eignen sich zur Spannungsstabilisierung für Schaltungen mit kleinem Stromverbrauch. Aber auch zur Spannungs-Begrenzung von Spannungsspitzen

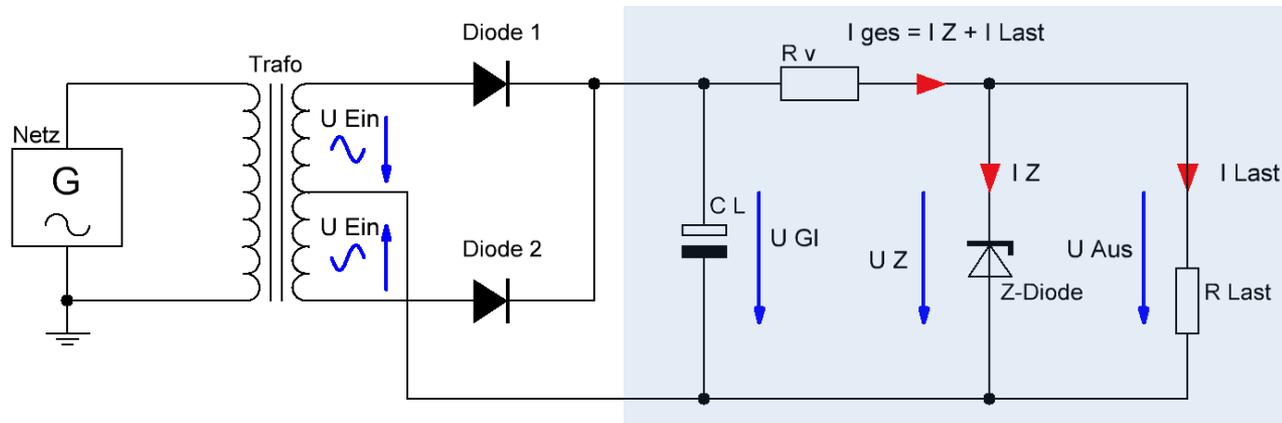
Die große Leitfähigkeit der Z-Diode ab der Durchbruchspannung macht eine Strombegrenzung durch einen Vorwiderstand ( $R_V$ ) notwendig. Ohne Vorwiderstand zerstört der Strom die Z-Diode. Der minimale Strom soll 1/10 des Maximalstroms sein.

$$R_V = \frac{U_{ges} - U_Z}{I_{ges}}$$

$$I_{ges} = I_{Zmin} + I_L$$



# Spannungsstabilisierung mit Z-Diode



Mit einer Reihenschaltung aus einem Widerstand und einer (Zener) Z-Diode erhält man die einfachste Form einer Spannungsstabilisierung. Sie eignet sich nur für Lasten mit geringer und weitgehend konstanter Stromaufnahme.

Eine Z-Diode wird in Sperrrichtung betrieben. Überschreitet die Spannung  $U_Z$  an der Diode die „Zenerspannung“, wird die Diode niederohmig und leitet. Das macht eine Strombegrenzung durch den Vorwiderstand  $R_V$  notwendig, ohne Vorwiderstand zerstört der Strom die Z-Diode. Dimensionierung :  $R_V = (U_{Gl} - U_Z) / I_Z$

Der Gesamtstrom  $I_{ges}$  berechnet sich aus dem minimalen Z-Dioden-Strom  $I_{Zmin}$  und dem Laststrom  $I_L$ . Der Laststrom ist der Strom, der durch die nachgeschaltete Schaltung verbraucht wird.

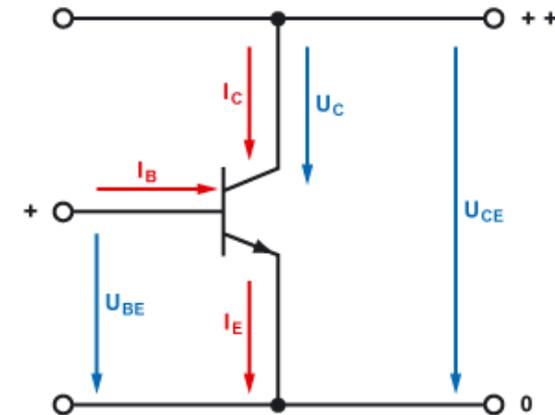
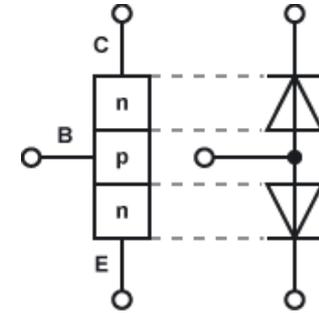
# Der bipolare Transistor

Jeder bipolare Transistor besteht aus drei Halbleiterschichten. Man unterscheidet zwischen einer npn- oder pnp-Schichtenfolge. Die Außenschichten des bipolaren Transistors werden Kollektor (C) und Emitter (E) genannt. Die mittlere sehr dünne Schicht hat die Bezeichnung Basis (B) und ist die Steuerelektrode oder auch der Steuereingang des Transistors.

Ein Kollektorstrom  $I_C$  fließt nur, wenn auch ein Basisstrom  $I_B$  fließt. Wird der Basisstrom  $I_B$  verändert, dann verändert sich auch der Kollektorstrom  $I_C$ . Der Kollektorstrom  $I_C$  ist um ein vielfaches größer als der Basisstrom  $I_B$ , Diesen Größenunterschied nennt man Stromverstärkung  $\beta$  (Beta).

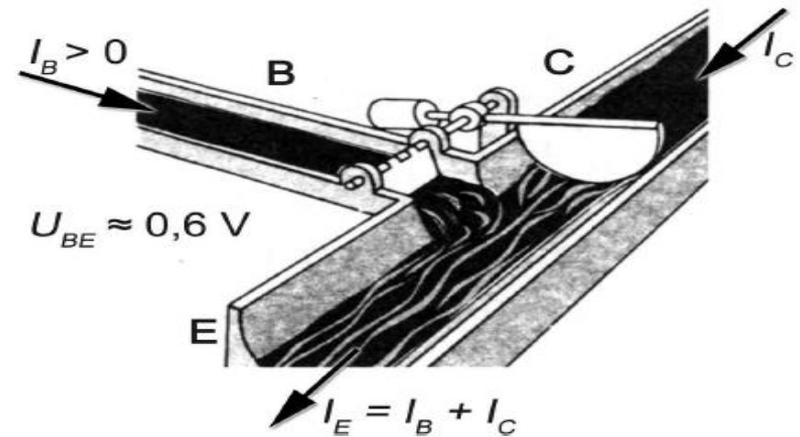
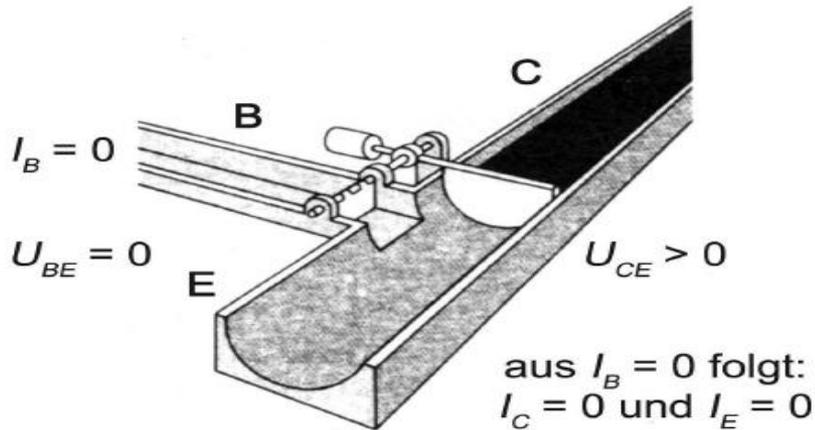
Der Transistor wirkt bei einer Basisstromänderung wie ein elektrisch gesteuerter Widerstand.

Ein Basisstrom  $I_B$  fließt erst dann, wenn die Schwellspannung  $U_{BE}$  ( $\approx 0,5 \dots 0,7V$ ) an der Basis-Emitter-Strecke erreicht ist. Wenn kein Basisstrom  $I_B$  fließt, dann sperrt der Transistor.



$U_{CE}$  = Kollektor-Emitter-Spannung  
 $U_{BE}$  = Basis-Emitter-Spannung  
 $I_C$  = Kollektorstrom  
 $I_B$  = Basisstrom  
 $I_E$  = Emitterstrom

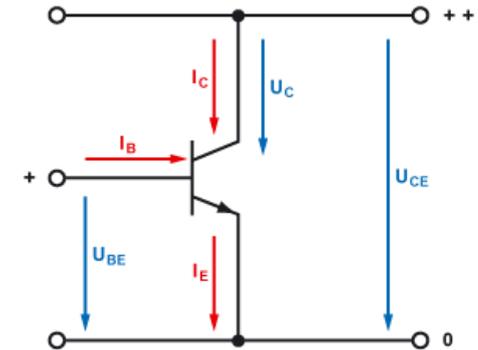
# Transistor Schleusenmodell



Das Schleusenmodell hilft uns, die Funktionsweise des Bipolartransistors zu verstehen:

Wir sehen den breiten Kanal von C nach E und den schmalen Steuerkanal von B nach E. Solange an B nichts fließt, ist die Schleuse durch die Klappe an C gesperrt.

Sobald aber ein kleiner Strom in die Basis B hineinfließt und gegen die Klappe drückt, wird auch die große Klappe im breiten Kanal geöffnet und der große Strom zwischen Kollektor C und Emitter E kann fließen.



# Kollektorschaltung (Emitterfolger)

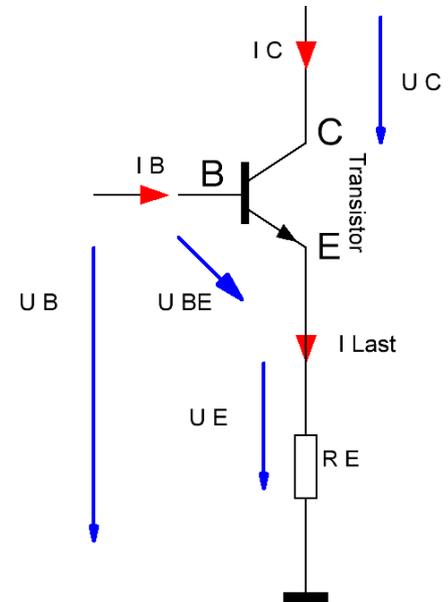
Bei der Kollektorschaltung ist der Emitter der Ausgang. Der Emitterwiderstand  $R_E$  kann z.B. der Lastwiderstand des nachgeschalteten Verbrauchers sein.

Wenn die Spannung  $U_B$  die Schwellenspannung  $U_{BE}$  überschreitet, wird der Transistor leitend. ( $U_{BE} \approx 0,6..0,8V$  bei Siliziumtransistoren). Die Spannung  $U_E$  am Ausgang, dem Emitter, folgt kontinuierlich der Eingangsspannung bis auf die Differenzspannung  $U_{BE}$ . Deshalb wird diese Schaltung auch Emitterfolger genannt.

Die Ausgangsspannung  $U_E$  ist um die Schwellenspannung  $U_{BE}$  der Basis-Emitter Diode kleiner als die Eingangsspannung  $U_B$ .

Der Emitterfolger hat eine hohe Stromverstärkung ( $\beta$ ) und weist daher einen großen Eingangswiderstand und einen kleinen Ausgangswiderstand auf.

Darum eignet sich der Emitterfolger besonders als Impedanzwandler zwischen hochohmigen Quellen und niederohmigen Lasten.



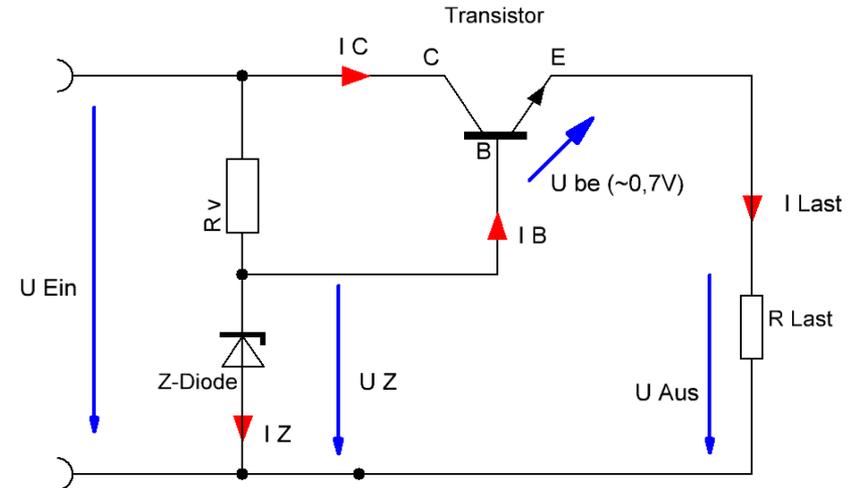
$$U_E = U_B - U_{BE}$$
$$I_E = I_B \cdot (1 + \beta)$$

$U_C$  = Kollektor-Spannung  
 $U_{BE}$  = Basis-Emitter-Spannung  
 $U_E$  = Emitter-Spannung  
 $I_C$  = Kollektorstrom  
 $I_B$  = Basisstrom  
 $I_E = I_{Last}$  = Emitterstrom  
 $\beta$  = Gleichstrom Verstärkungsfaktor

# Z-Diode und Emitterfolger

Die Z-Diode hält die Spannung  $U_Z$  auch bei schwankender Eingangsspannung stabil. Doch Z-Dioden können nur mit einem geringen Strom belastet werden.

Um dieses Problem zu umgehen, wird ein Emitterfolger als Stromverstärker eingesetzt.

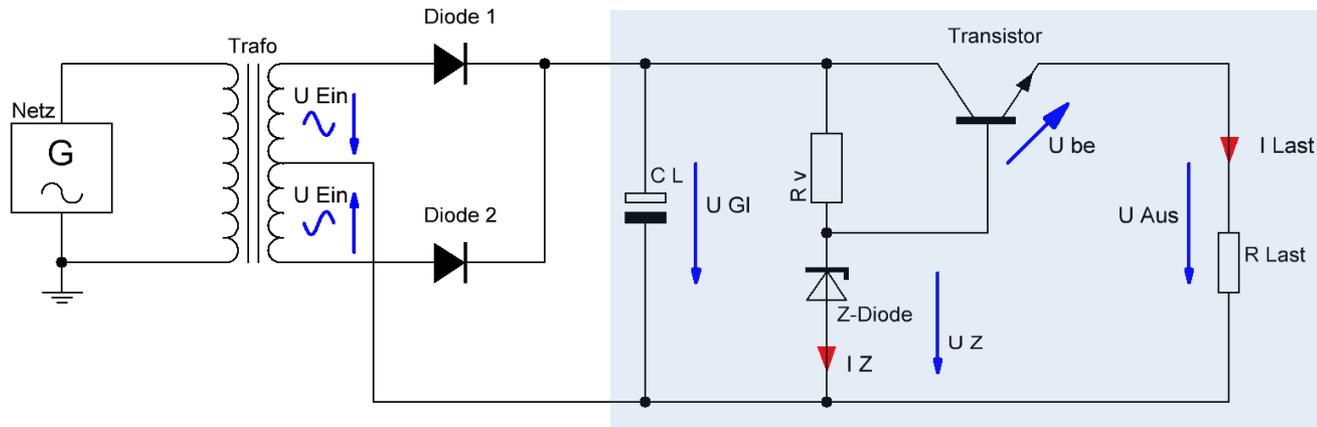


Mit dieser Schaltung sinkt die Belastung der Z-Diode durch  $I_B$  um den Faktor der Stromverstärkung  $\beta$  des Transistors.

Die Ausgangsspannung an  $R_{Last}$  folgt der stabilisierten Spannung  $U_Z$  abzüglich der Schwellenspannung  $U_{be}$  die üblicherweise um 0,7V liegt.

Um eine ausreichende Stabilität zu erreichen, sollte der Strom durch die Z-Diode mindestens 5 mal größer sein, als der Basisstrom  $I_B$  des Transistors bei maximaler Last. Danach ist der Vorwiderstand  $R_V$  zu dimensionieren.

# Stabilisierung mit Längstransistor



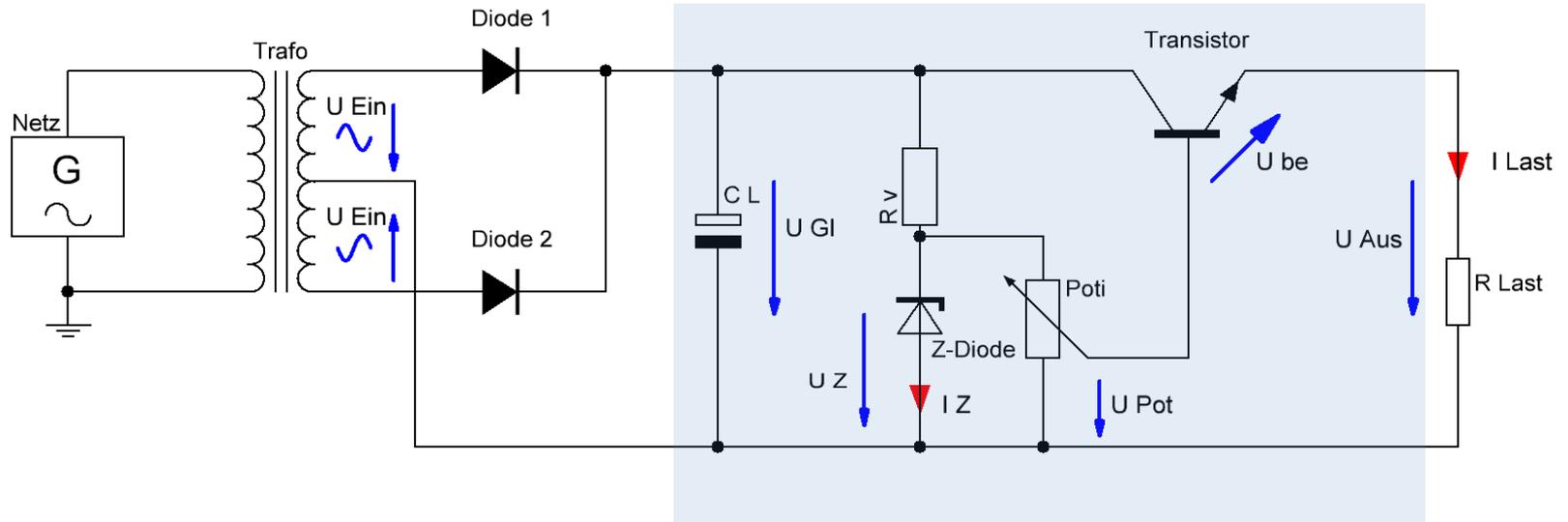
Z-Dioden können nur mit einem geringen Strom belastet werden, darum wird ein Transistor als Stromverstärker (Emitterfolger) eingesetzt. Der Ausgangswiderstand am Emitter ist um den Faktor der Stromverstärkung des Transistor niedriger, als der Eingangswiderstand an der Basis.

Die Ausgangsspannung  $U_{\text{aus}}$  wird durch die Zenerspannung  $U_Z$  abzüglich der Basis-Emitter-Spannung  $U_{\text{be}}$  bestimmt. ( $U_{\text{be}}$  entnimmt man dem Datenblatt, der Wert kann je nach Transistor und abhängig vom Laststrom zwischen 0,5 und 4V liegen)

$$U_{\text{Aus}} = U_Z - U_{\text{be}}$$

Bei dieser einfachen Schaltung wird bei einem Kurzschluss am Ausgang oder bei zu kleinem Lastwiderstand der Transistor zerstört. In der Praxis ist daher meist noch ergänzender Schaltungsaufwand zur Strombegrenzung notwendig.

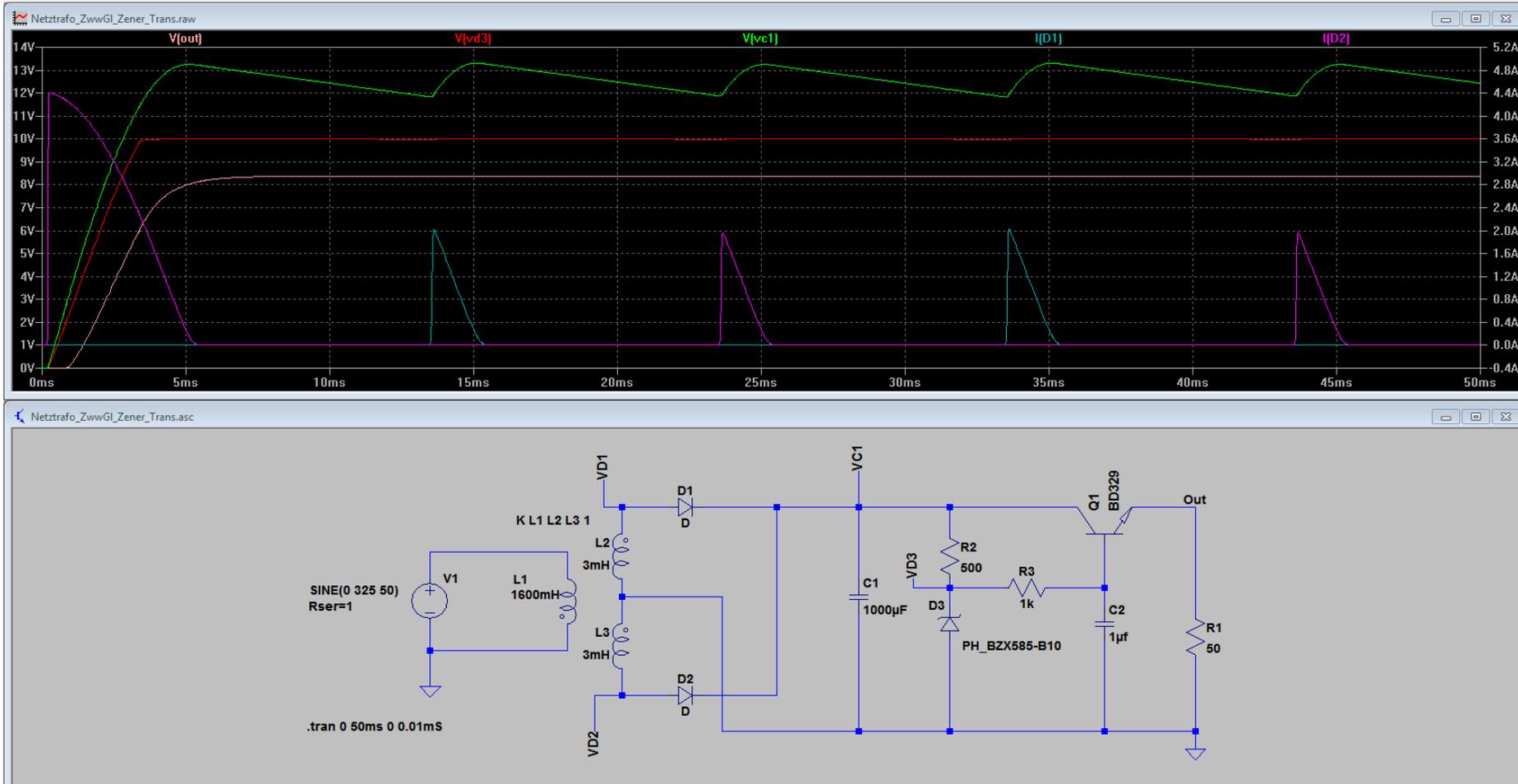
# Einstellbare Ausgangsspannung



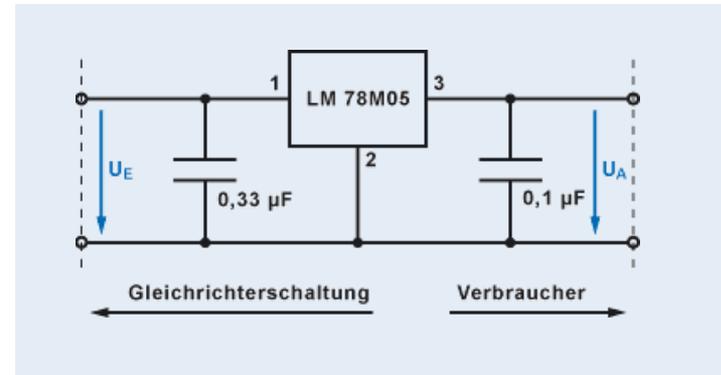
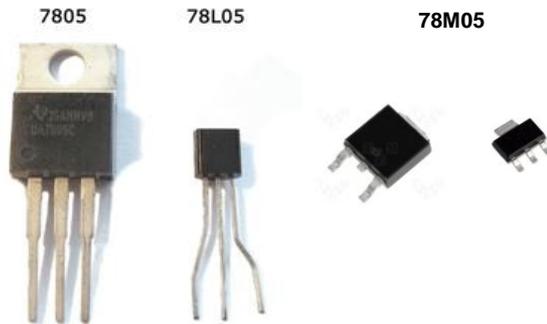
Teilt man die stabilisierte Spannung an der Zenerdiode über einen regelbaren Spannungsteiler (Potentiometer), dann lässt sich damit die Ausgangsspannung des Netzteils einstellen.

Die Ausgangsspannung  $U_{Aus}$  ist gleich der Spannung  $U_{Pot}$  am Schleifer des Potis -  $U_{be}$

# Längsgeregeltes Netzteil - Simulation

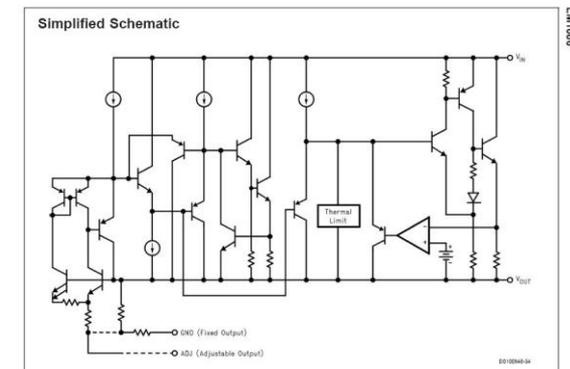


# Integrierte lineare Spannungsregler

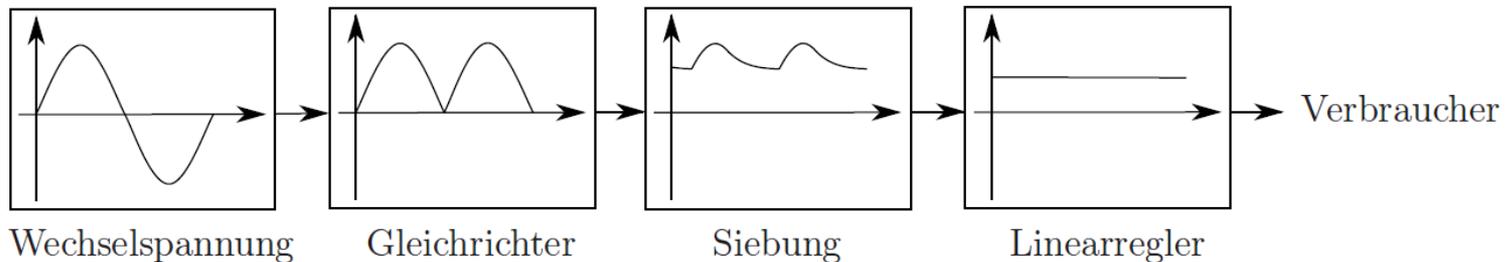


Wenn in einer Schaltung stabile Spannungswerte gefordert werden, kommen heute meist integrierte Festspannungsregler zum Einsatz. Es gibt sie für die gebräuchlichsten positiven und negativen Spannungswerte und auch einstellbar.

Sie bestehen aus komplexen Stabilisierungsschaltungen mit mehreren Verstärkerstufen. Zusätzlich haben sie eine interne Strombegrenzung, die bei Überlastung und Kurzschluss einsetzt. Bei einem Kurzschluss regelt der Festspannungsregler seine Ausgangsspannung automatisch herunter. Eine thermische Schutzschaltung verhindert die Zerstörung des ICs durch Überhitzung.



# Lineargeregelte Netzteile



Die längsgeregelten Spannungs Stabilisierungsschaltungen erzeugen viel Verlust-Wärme, die abgeführt werden muss.

Der Wirkungsgrad ist schlecht.

Es sind große Transformatoren und Kühlkörper notwendig.

Vorteil eines lineargeregelten Netztes ist eine konstante Ausgangsspannung mit geringer niederfrequenter Restwelligkeit. Der Aufwand zur Entstörung ist gering.

# Schalt-Netzteil (SNT)

Im Vergleich zu analog geregelten Netzteilen haben Schaltnetzteile signifikante Vorteile. Es werden Wirkungsgrade von 70 bis 95% erreicht. Dies führt zu nur geringer Erwärmung. Zum anderen führt die hohe Taktfrequenz zu kleiner Bauteilgröße und geringem Gewicht.

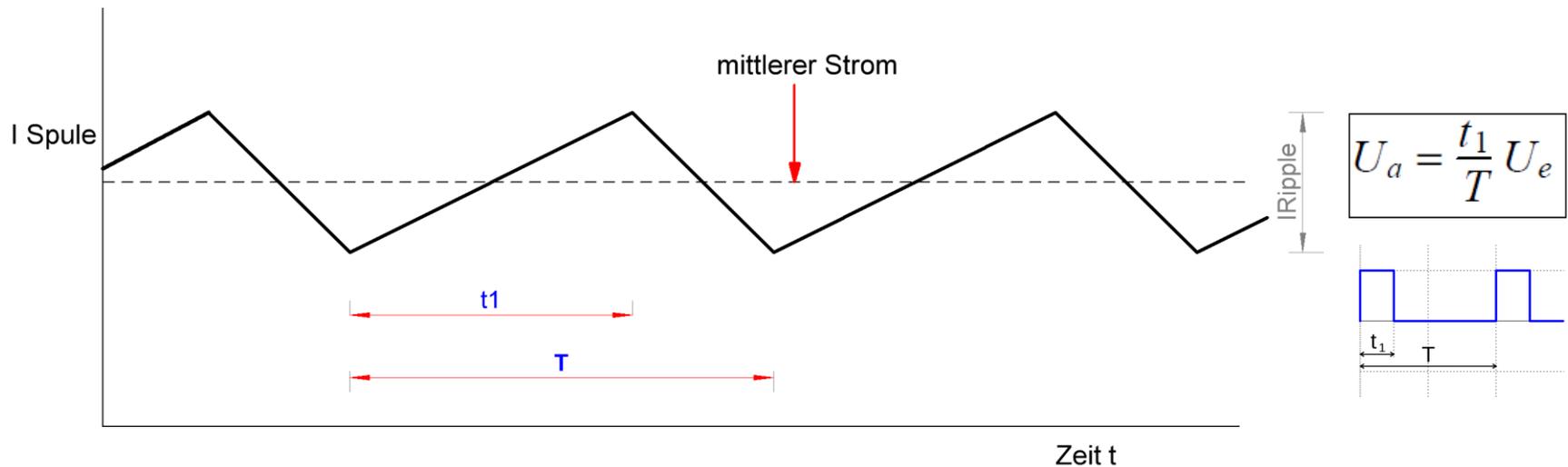
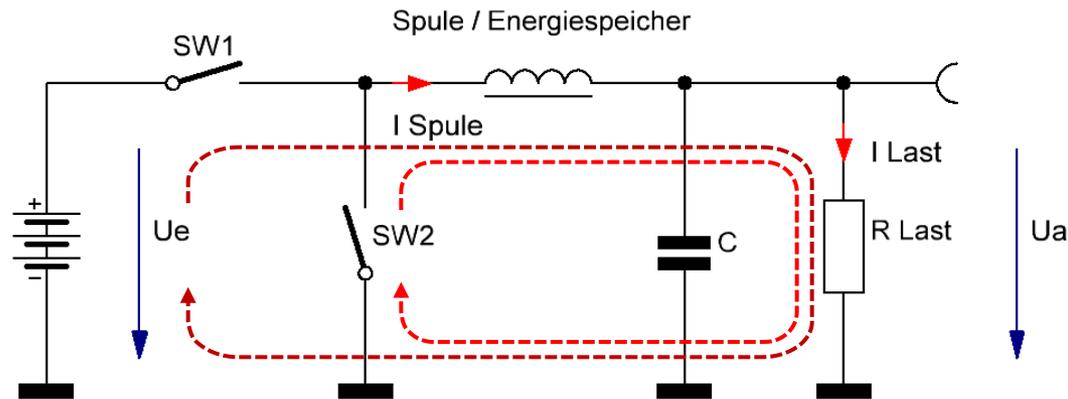
Schaltnetzteile arbeiten grundsätzlich alle nach dem gleichen Prinzip: Mittels eines Schaltgliedes (z.B. Schalttransistor) werden Energieportionen mit einer hohen Taktfrequenz aus der Eingangsquelle entnommen und an den Ausgang zur Last durchgereicht.

Übliche Taktfrequenzen liegen, je nach Leistung, zwischen 20kHz und 500kHz, bei kleinen Leistung auch bis 2 MHz. Das Verhältnis zwischen Einschalt- und Ausschaltzeit des Schaltgliedes (Tastverhältnis) bestimmt den mittleren Energiefluß.

# Spule: im Magnetfeld steckt Energie

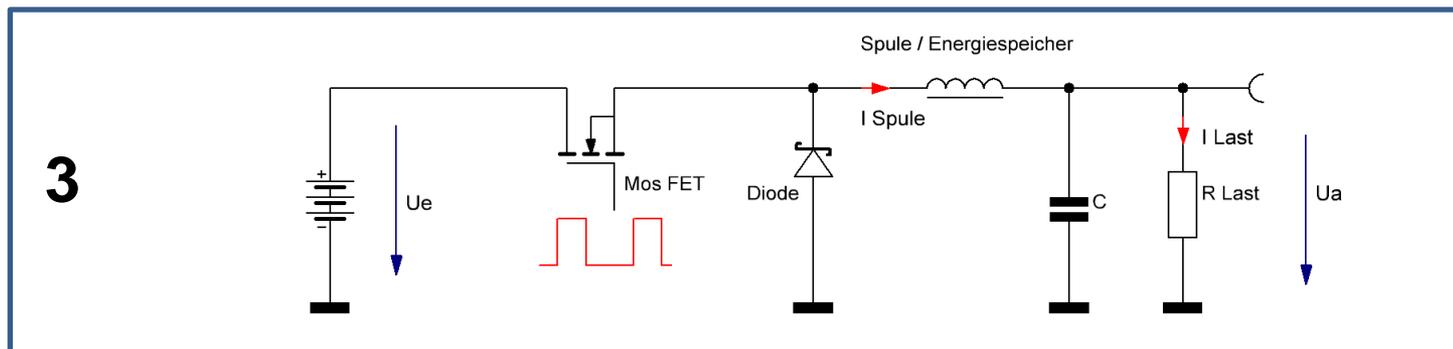
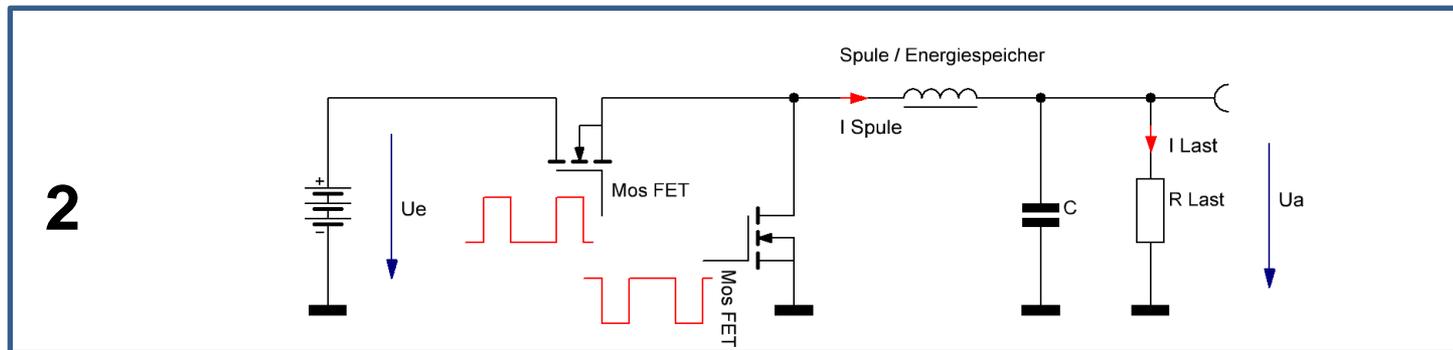
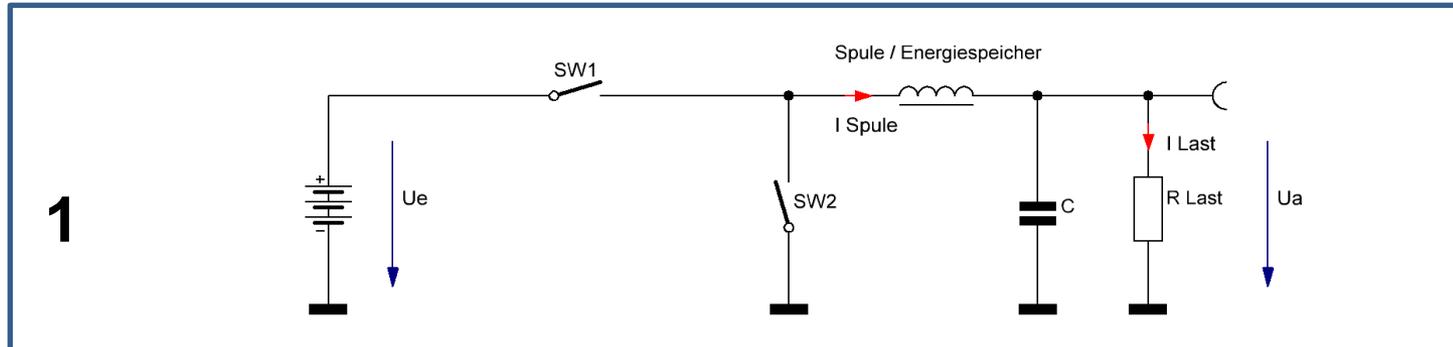
- Ein Strom, der durch eine Spule fließt, erzeugt ein magnetisches Feld. In dem magnetischen Feld ist Energie gespeichert.
- Eine Spule (Induktivität, Drossel, etc.) ist ein konservatives Element und „versucht“, das einmal vorhandene Magnetfeld beizubehalten.
  - „Will“ ein externer Strom das Magnetfeld verstärken, wird sofort eine *Gegenspannung* erzeugt, die den Stromanstieg bremst. (*Selbstinduktion*)
  - „Will“ ein externer Strom das Magnetfeld abschwächen, wird sofort eine *Mitspannung* erzeugt, die einen zusätzlichen Strom erzeugt, der so gerichtet ist, dass das Magnetfeld verstärkt wird.
- Lenzsche Regel: *„Der Induktionsstrom ist stets so gerichtet, dass er die Ursache seiner Entstehung zu hemmen sucht“*
- Wenn eine Gleich-Spannung an die Spule angelegt wird, dann steigt der Strom nicht sprunghaft an, sondern erhöht sich mit der Zeit, bis er einen Endwert abhängig von dem Draht-Widerstand der Spule erreicht hat.

# Prinzip des Schaltwandlers

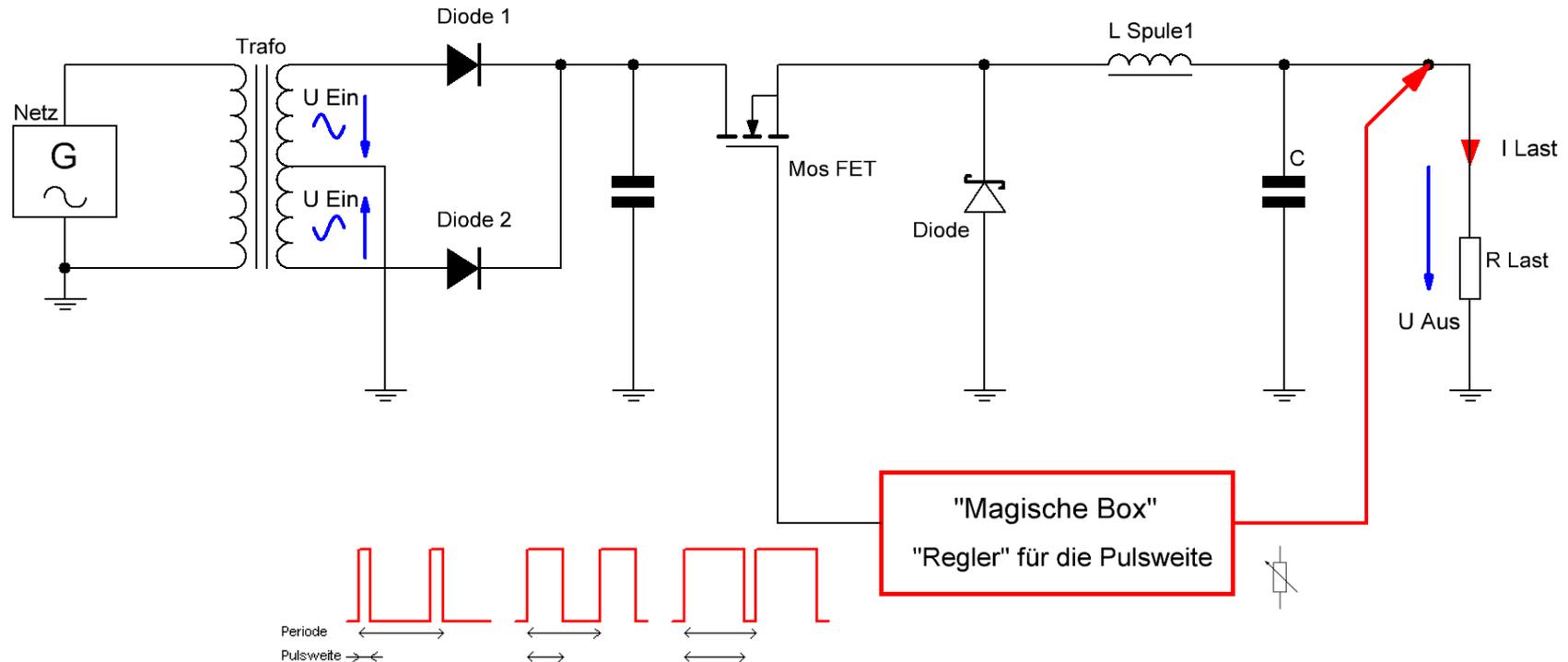


Periodischer Ablauf: In der Zeit  $t_1$  ist SW1 geschlossen, den Rest der Zeit nach  $t_1$  bis zum Ende der Periodendauer  $T$  ist SW1 offen und SW2 geschlossen usw.

# MOSFET und Diode als Wechselschalter

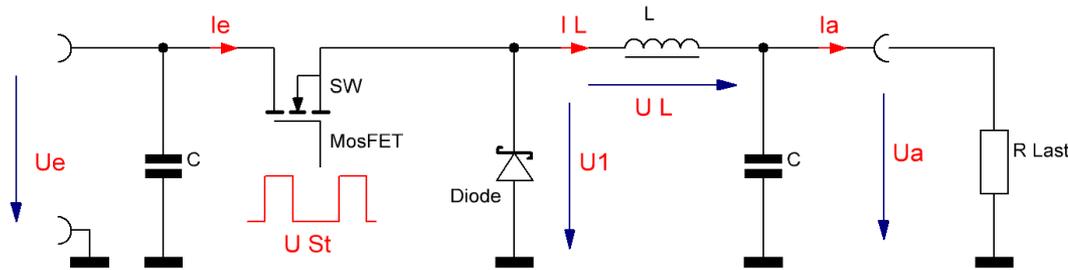


# Schaltnetzteil mit Pulsweitenregelung

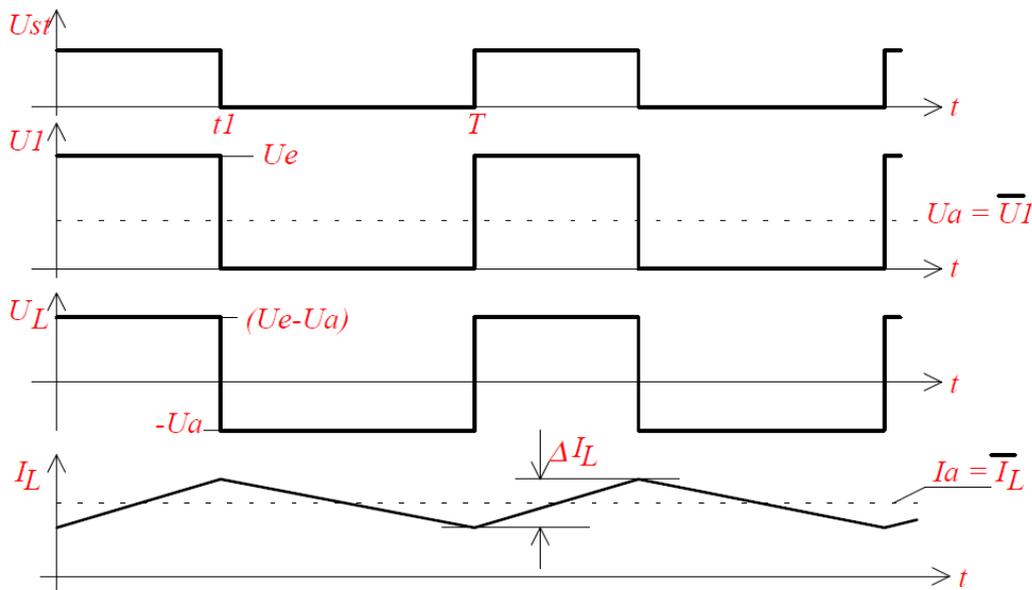
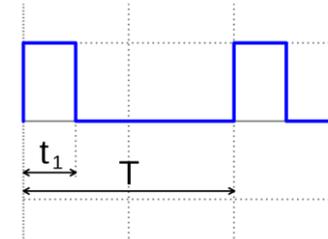


Um die Ausgangsspannung einstellbar zu machen, misst eine Regelschaltung die Spannung am Ausgang und ändert das Tastverhältnis  $t_1/T$  jeweils so, dass die gewünschte Ausgangsspannung erreicht und konstant gehalten wird. (Pulsweitenmodulation). Als Regler gibt es zahlreiche integrierte Schaltkreise.

# Sekundär getaktete Wandler (DC-DC)



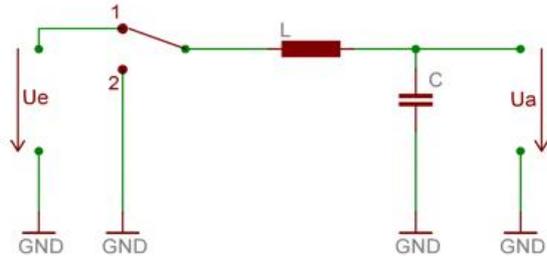
$$U_a = \frac{t_1}{T} U_e$$



Die Ausgangsspannung ist im kontinuierlichen Betrieb nur vom Tastverhältnis ( $t_1/T$ ) und der Eingangsspannung abhängig, und entspricht damit dem Mittelwert der getakteten Spannung hinter dem Schalter. Sie ist lastunabhängig.

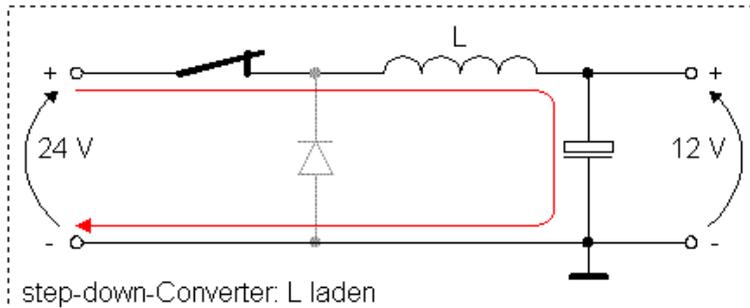
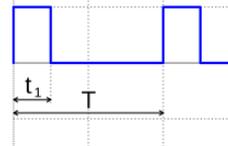
Das Tastverhältnis (eng. Duty Cycle) bei einem periodischen Schaltsignal ist das Verhältnis zwischen der Zeit  $t_1$  in der das Signal „ein“ ist im Verhältnis zur gesamt-Periodendauer  $T$  („ein“ + „aus“)

# Abwärtswandler (Step down)

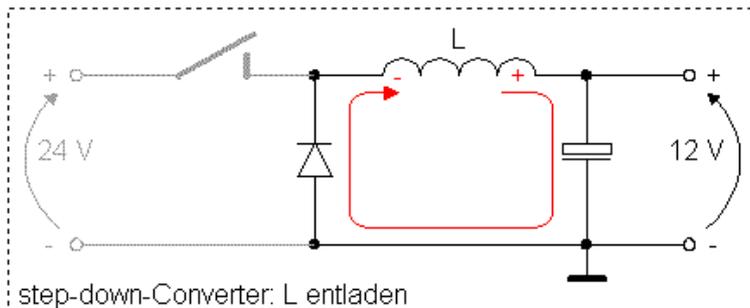


Wechselt der Schalter zwischen Position 1 und 2 liegt am linken Anschluss der Spule eine Rechteckspannung an, deren Mittelwert je nach Tastverhältnis zwischen 0V und  $U_e$  liegt. Spule und Kondensator bilden dann ein LC-Filter und geben genau diesen Mittelwert als Gleichspannung aus. Die Schalterstellung 2 kann durch eine Diode gegen Masse ersetzt werden.

$$U_a = U_e (t_1/T)$$



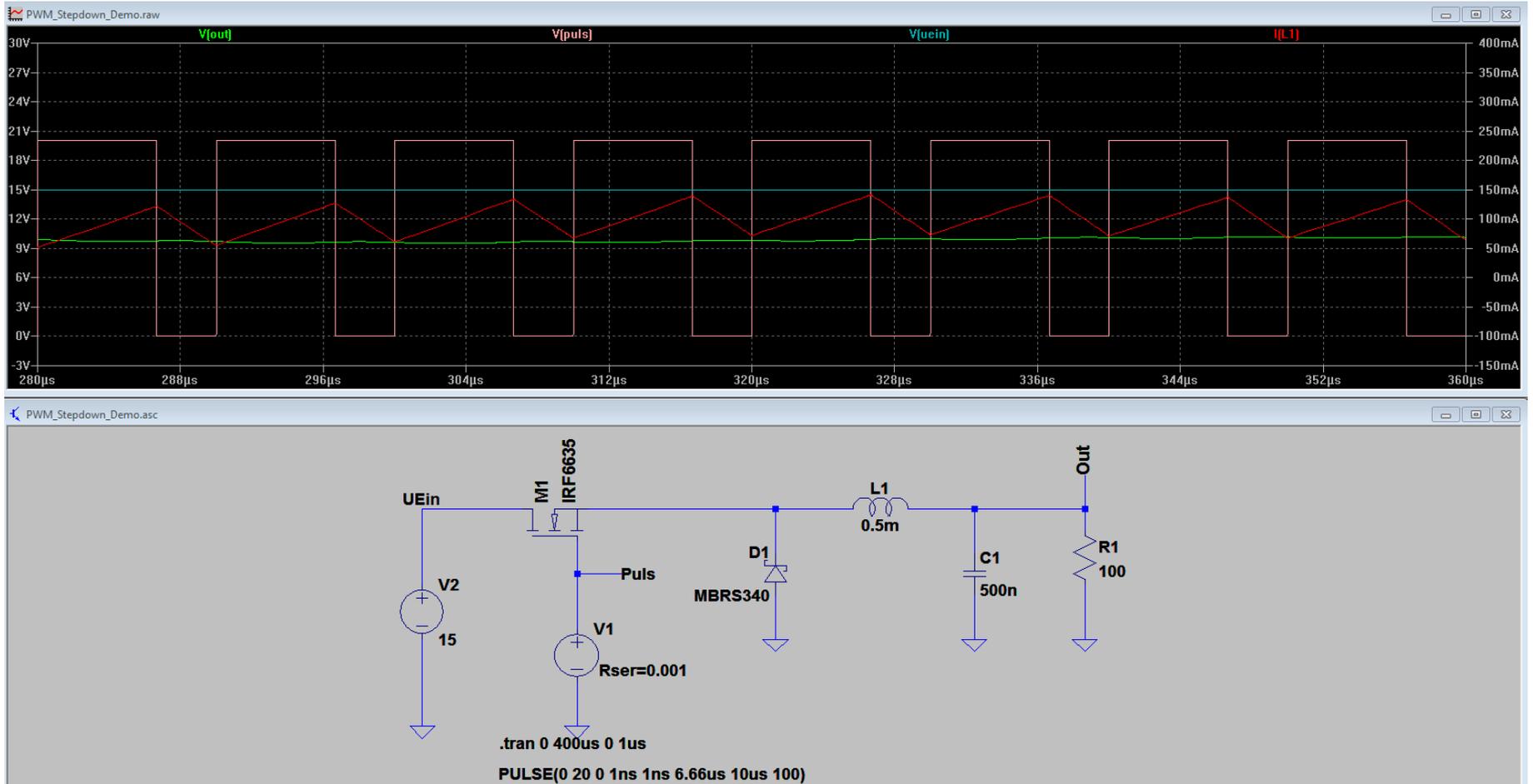
**ON-Zeit** Bei geschlossenem Schalter steigt der Strom durch die Spule linear an. Mit steigendem Strom baut sich das Magnetfeld auf, die Spule wird mit Energie aufgeladen. Der Strom durch die Spule und damit die in ihr gespeicherte Energie steigt mit der Länge der ON-Zeit. Der Schalter darf nur kurze Zeit geschlossen sein, ansonsten steigt die Ausgangsspannung bis zum Pegel der Eingangsspannung an.



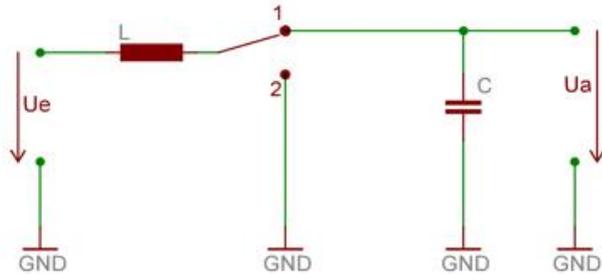
**OFF-Zeit** Wird nun der Schalter geöffnet, entlädt sich die Spule über die Diode und lädt den Kondensator auf. Die Stärke des Stromflusses aus der Spule nimmt dabei kontinuierlich ab.

Die Ladung des Kondensators hält die Spannung an dem Verbraucher während der Zeit, in der die Spule sich lädt und entlädt auf einem mittleren Wert (Glättung und Siebung)

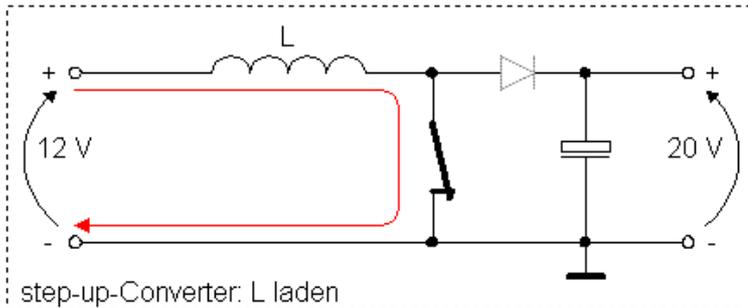
# Simulation - Step down



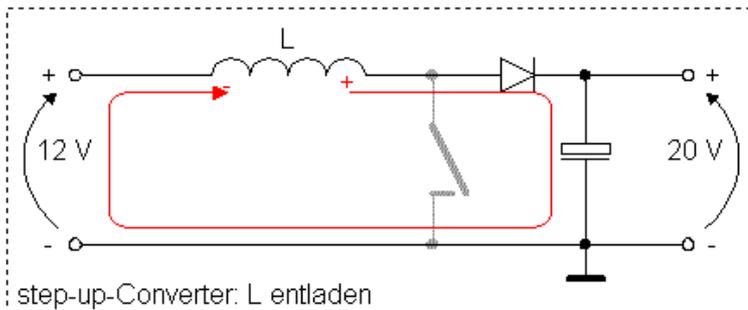
# Aufwärtswandler (Step up)



Befindet sich der Schalter in Position 2 fließt Strom durch die Spule in Richtung Masse. Wird danach der Schalter in Position 1 gebracht, treibt die Spule den Strom in gleichbleibender Richtung weiter und lädt damit den Kondensator auf. Spätestens wenn die Spule die gesamte gespeicherte Energie abgegeben hat, muss der Schalter wieder auf Position 2 gestellt werden um einen erneuten Umladevorgang zu verhindern. Auch bei dieser Schaltung lässt sich der Wechselschalter durch einen einfachen Schalter und für Stellung 1 durch eine Diode ersetzen.  $U_a = U_e (T / t_{aus})$

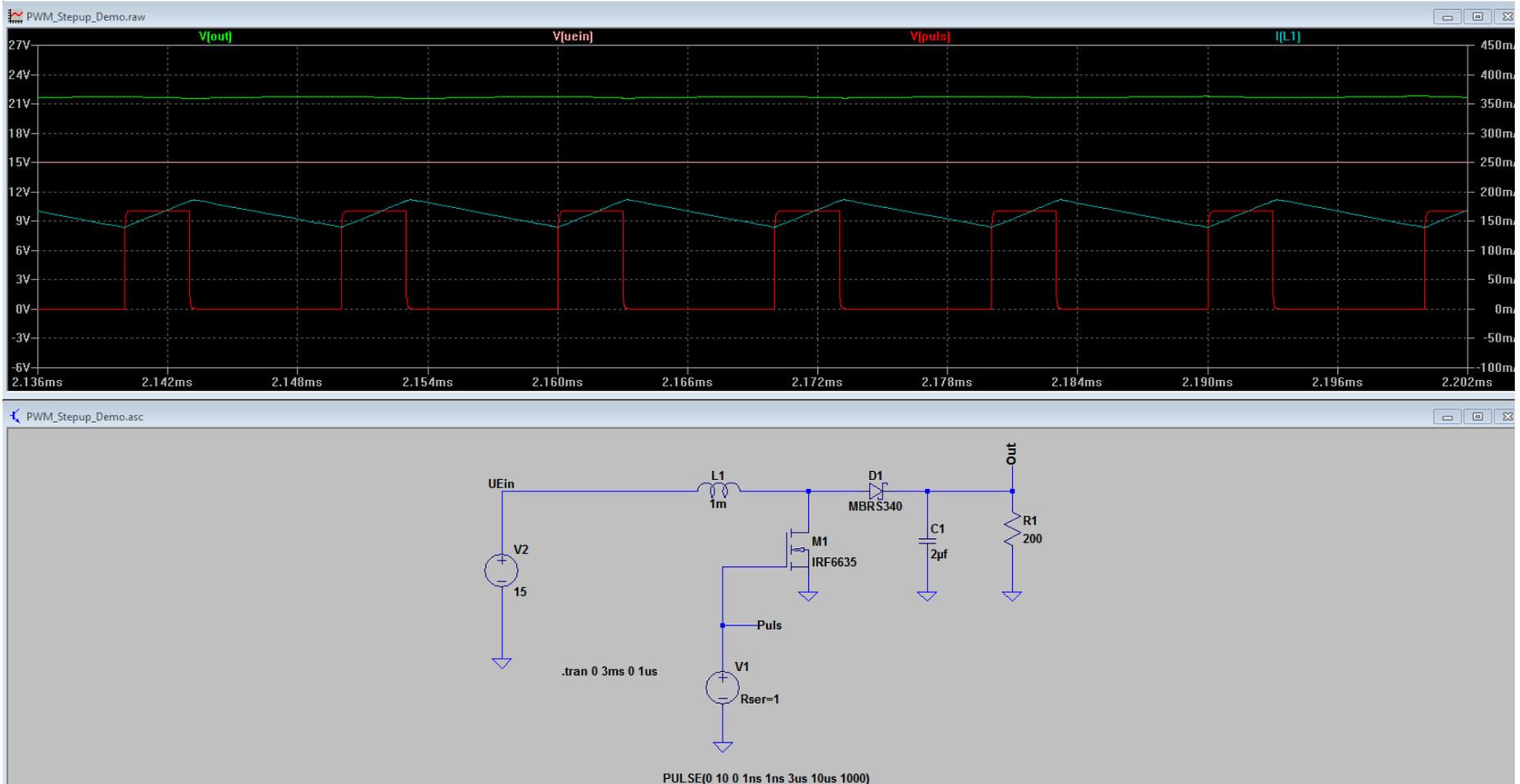


ON-Zeit Bei geschlossenem Schalter steigt der Strom durch die Spule linear an. Mit steigendem Strom baut sich das Magnetfeld auf, die Spule wird mit Energie aufgeladen. Der Strom durch die Spule und damit die in ihr gespeicherte Energie steigt mit der Länge der ON-Zeit.

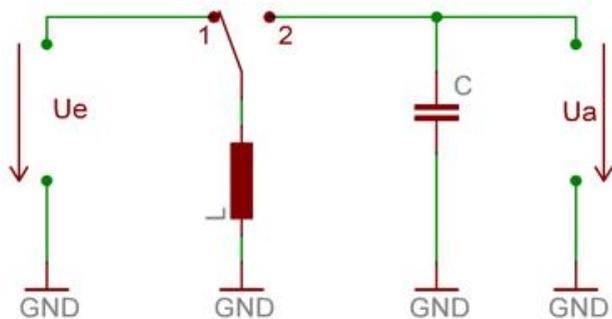


OFF-Zeit Nach dem Öffnen des Schalters hält die Spule einen Strom solange aufrecht, bis sich ihre gespeicherte Energie entladen hat. Dabei nimmt die Stromstärke kontinuierlich ab. Die von der Spule induzierte Spannung ist der Eingangsspannung in Reihe geschaltet und addieren sich. Die Summe aus Eingangsspannung und induzierter Spannung lädt über die Diode den Ausgangskondensator.

# Simulation – Step Up



# Invertierender Wandler



Als letzter der drei sekundärgetakteten Schaltreglern soll nun noch der Invertierende Wandler vorgestellt werden. Wie der Name vermuten lässt, kann damit eine Spannung umgekehrter Polarität bezüglich der Eingangsspannung am Ausgang erzeugen werden. Und auch hier lässt dich der Wechselschalter durch eine Diode in einen einfachen Schalter verwandeln

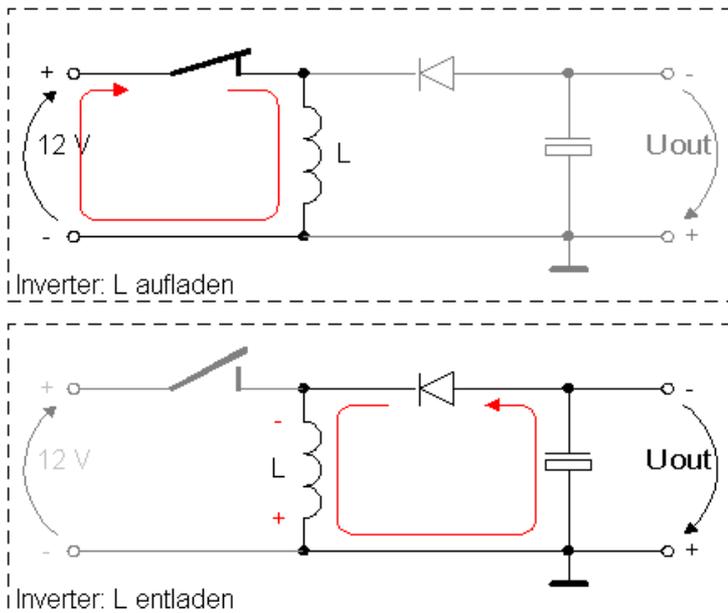
$$U_a = -U_e (t_{\text{ein}}/t_{\text{aus}})$$

Funktion:

ON-Zeit Bei geschlossenem Schalter steigt der Strom durch die Spule linear an. Mit steigendem Strom baut sich das Magnetfeld auf, die Spule wird mit Energie aufgeladen. Der Strom durch die Spule und damit die in ihr gespeicherte Energie steigt mit der Länge der ON-Zeit.

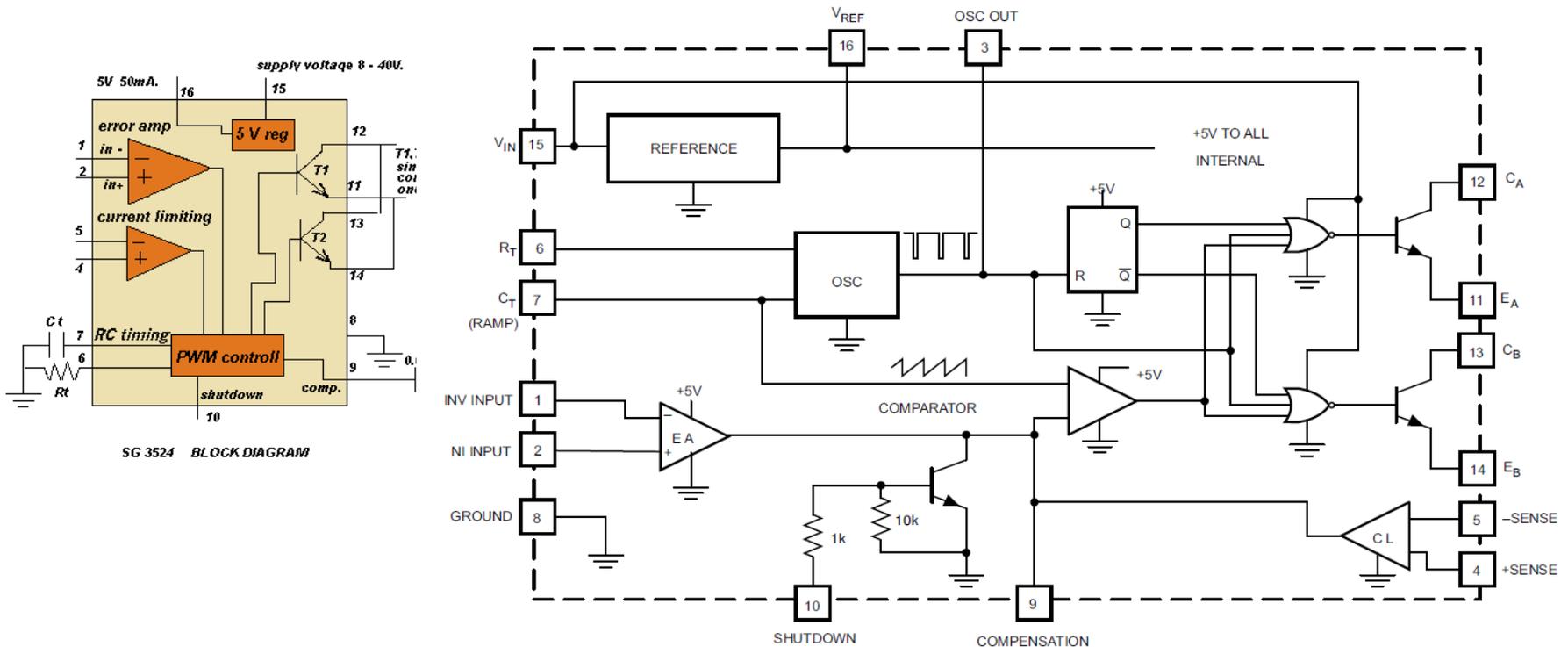
OFF-Zeit Nach dem Öffnen des Schalters hält die Selbstinduktionsspannung der Spule den Strom so lange aufrecht, bis sie sich entladen hat. Die Richtung des Stromflusses aus der Spule über die Diode lädt den Kondensator auf negative Spannungswerte auf.

Liegt diese Spannung unterhalb der Spannung am Kondensator, kann Strom aus der Spule in den Kondensator fließen und Energie in den Kondensator geladen werden. Ist in der Spule keine oder nur noch wenig Energie gespeichert, wird der Schalter wieder geschlossen und der Vorgang beginnt periodisch erneut.



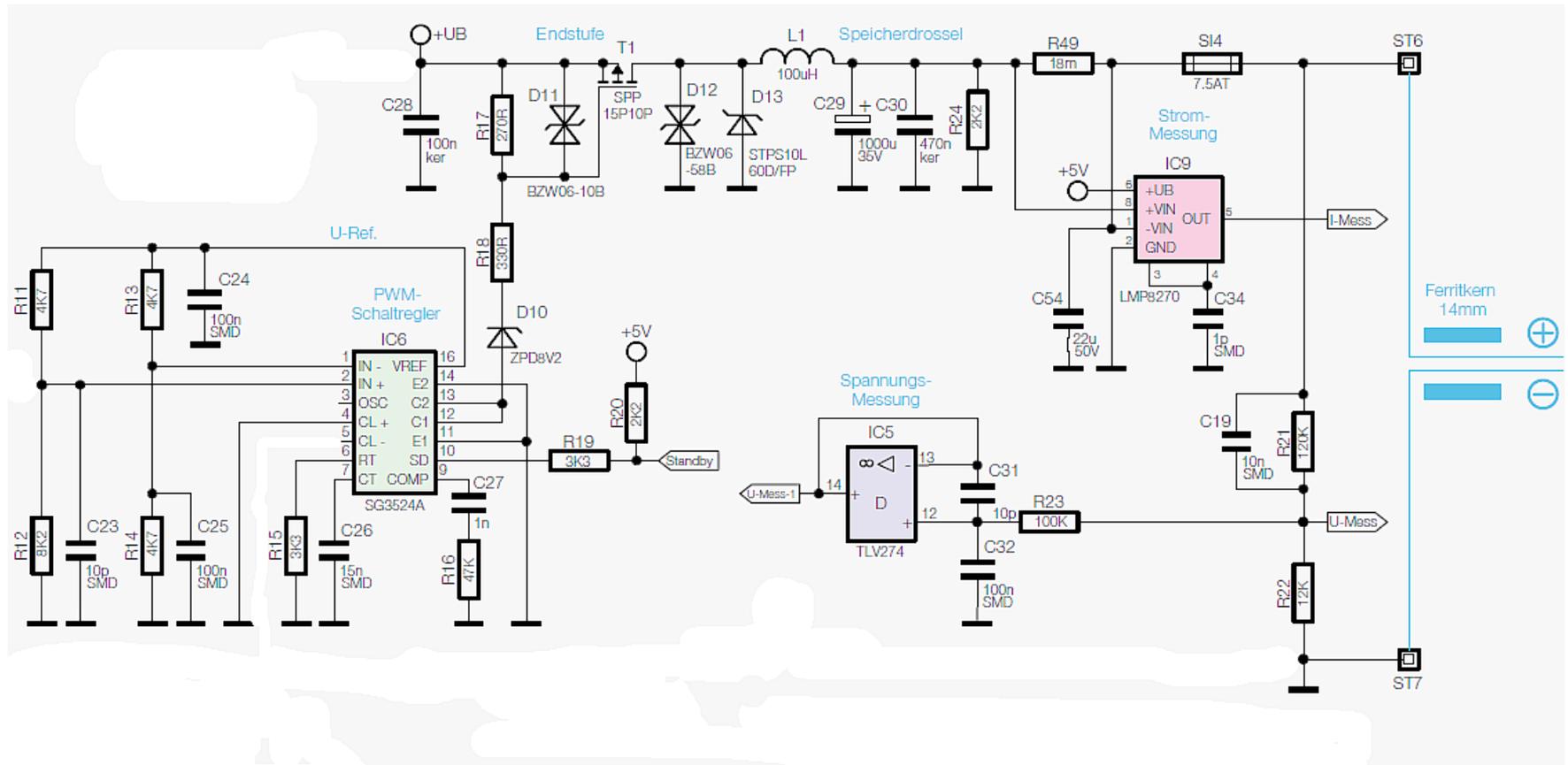
# SG3524 – PWM Schaltregler IC

Eine magische Box, die die passenden Impulse für den Halbleiter-Schalter erzeugt.



Von der Industrie gibt es eine Vielzahl von integrierten Schaltkreisen, die alle notwendigen Steuer und Regel-Funktionen zum Bau der verschiedensten Schaltnetzteile in einem IC vereinigen.

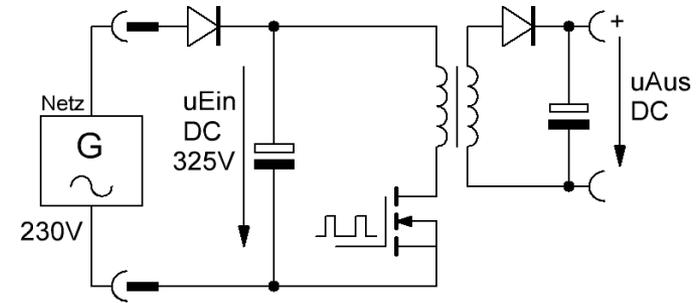
# Schaltbildauszug ELV SPS 5630



Beispiel eines kommerziellen sekundärgetakteten Step-Down Schaltnetzteils: Ein industriell hergestelltes Pulsweiten-Regel-IC SG3224 taktet den Schalttransistor T1. Die Spule L1 (Speicherdrossel) zusammen mit der Diode D13 bildet den Step-Down Wandler.

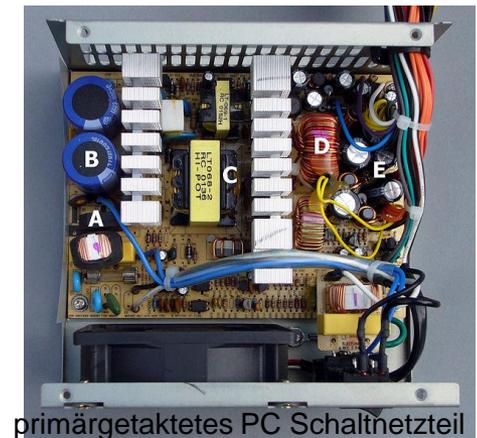
# Primär getaktete Schaltnetzteile

Primär getaktete Schaltnetzteile bieten eine galvanische Trennung zwischen Eingang und Ausgang. Ihre Schalttransistoren arbeiten auf der Primärseite des Transformators auf gleichgerichtetem Netzpotential.

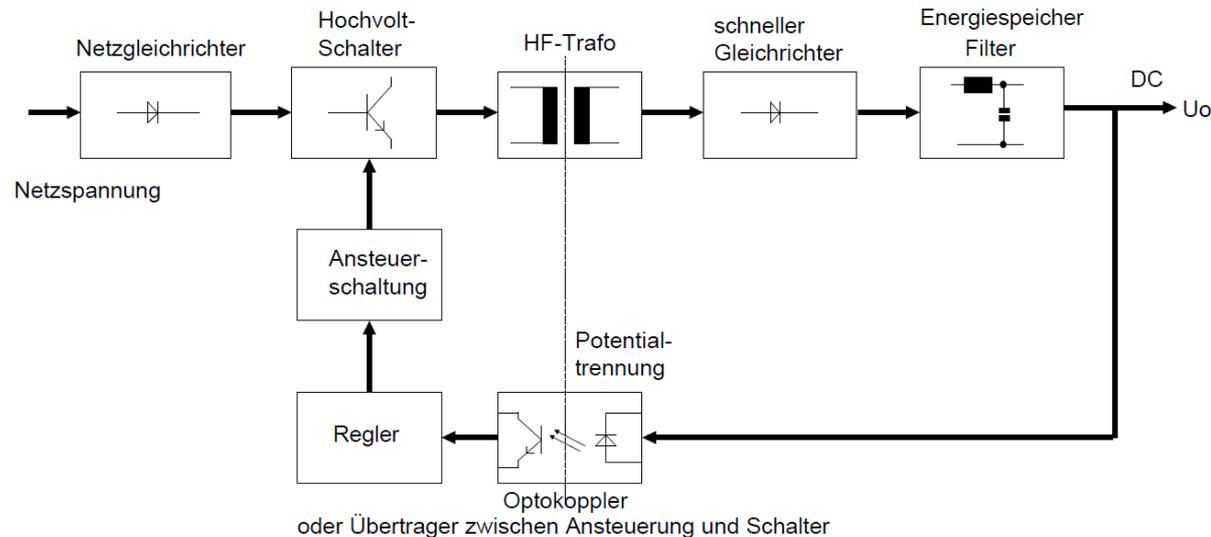


Die gleichgerichtete Netzspannung wird mit Schalttransistoren zerhackt und mit einer hohen Taktfrequenz über einen Hochfrequenz-Transformator auf die Sekundärseite übertragen. Die mit einem Trafo übertragbare Leistung steigt bei konstanter Masse etwa proportional zur Frequenz. Umgekehrt kann man sagen: das Trafovolumen verringert sich in dem Maße, wie die Frequenz zunimmt.

Computernetzteile und die leichten Steckernetzteile sind Beispiele für primär getaktete Netzteile.



# Primär getakteter Schaltregler



Vorteile gegenüber sekundär getakteten Reglern:

Wesentlich kleinerer HF-Übertrager, Verluste, Kosten und Gewicht des 50Hz Netz-Trafos entfallen, hoher Wirkungsgrad, preisgünstig herzustellen.

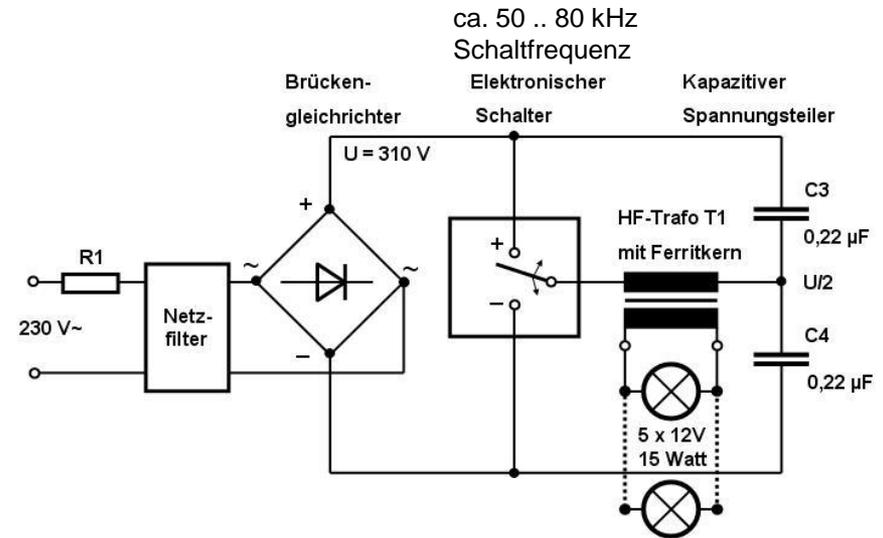
Nachteile gegenüber sekundär getakteten Reglern:

Potentialtrennung in der Ansterelektronik, Stand-By Hilfsspannung erforderlich, hohe Rest-Welligkeit der Ausgangsspannung, hohe Anforderungen an die Bauelemente. Die schnellen Strom- und Spannungsimpulse im Schaltnetzteil führen zu hochfrequenten Störungen, die aufwändig zu filtern sind. (EMV!)



# „Elektronischer Trafo“, AC-AC SNT

Herkömmliche Netztransformatoren sind wegen der tiefen Frequenz von 50Hz groß, schwer und teuer. Für Niedervolt Beleuchtungen werden daher zunehmend sogenannte elektronische Transformatoren verwendet, die nach dem Prinzip des primärgetakteten Schaltnetzteils funktionieren. Sie werden billig in Massen hergestellt und verursachen oft beträchtliche EMV Probleme.



# Referenzen und weiterführende Lit.

Linear Technology Corp, LT-Spice: <http://www.linear.com/designtools/software/#LTspice>

Gunthard Kraus, DG8GB, <http://www.gunthard-kraus.de/>

Simulationen mit LT-Spice, Band 1: Einführung und Elektronik-Praxisprojekte. Tutorial-Version 2.1

Prof. Dr.-Ing. Heinz Schmidt-Walter, Hochschule Darmstadt, Skript „Schaltnetzteile“

Prof. Lenz Haggemiller, FH-Regensburg, Vorlesungsskript Schaltnetzteile,

Schaltnetzteile auf Lötstelle.net,

<http://www.loetstelle.net/grundlagen/schaltnetzteile/schaltnetzteile.php>

[www.sprut.de](http://www.sprut.de), Schaltregler Grundlagen

Bob Dildine, W6FSH, „Buck Converter Basics“, QEX Jan/Feb 2013

# Anhang

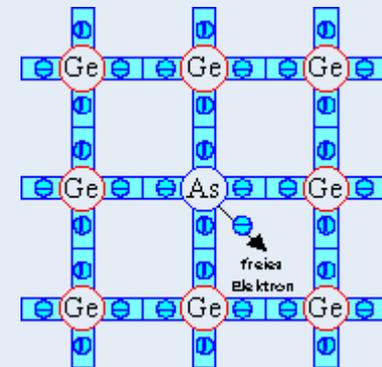
- **Physikalische Gesetzmäßigkeiten**
- **Erläuterungen**

# Nützlicher Dreck - Dotierung

Halbleiter wie Germanium, Silizium, Gallium oder Selen stehen bezüglich ihrer Leitfähigkeit zwischen Leitern und Nichtleitern. Durch gezieltes Verunreinigen (Dotierung) eines Halbleiterkristalls kann man seine Eigenschaften beeinflussen.

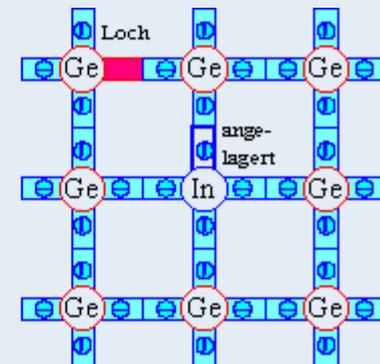
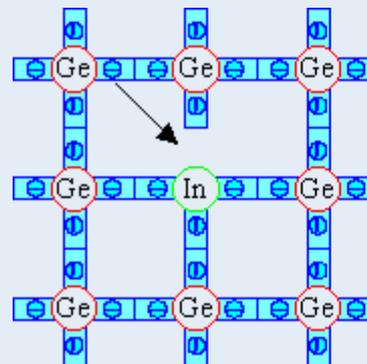
## N-Halbleiter

Durch Dotieren eines Halbleiterkristalls mit 5-wertigen Atomen (z.B. Arsen) entsteht ein n-Halbleiter. Das fünfte Elektron des Arsenatoms ist für die Kristallverbindung nicht nötig und bleibt übrig. Es wird zu einem freien Leitungselektron (Majoritätsträger).

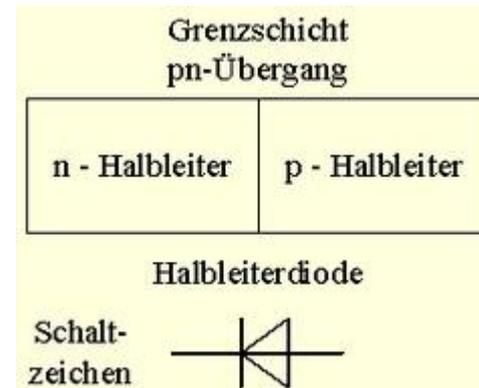
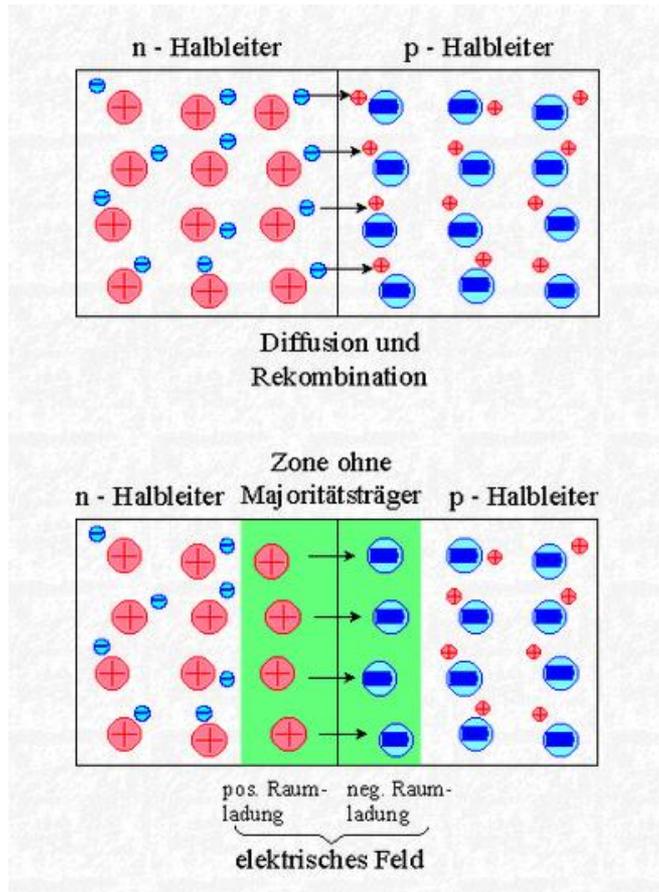


## P-Halbleiter

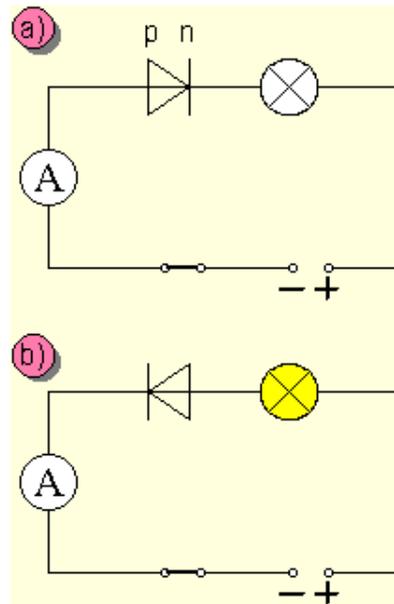
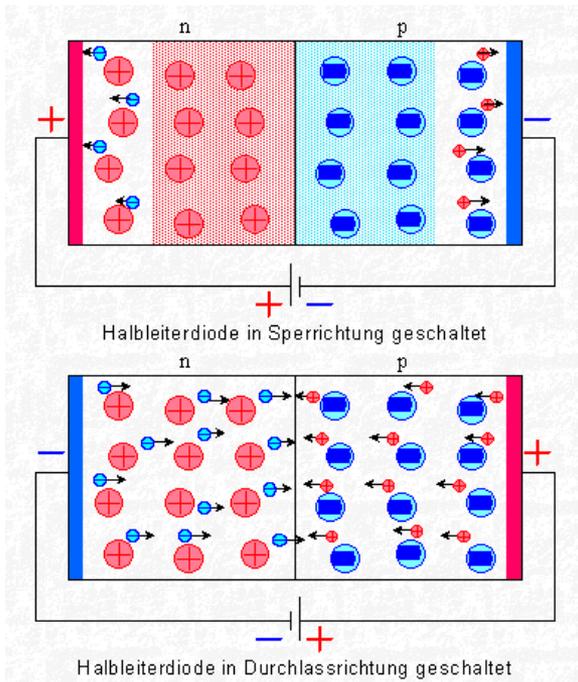
Durch Dotieren mit 3-wertigen Atomen (z.B. Indium) entsteht ein p-Halbleiter. Das Indium entzieht dem Kristallgitter ein Elektron, so dass ein Loch entsteht, in das andere Elektronen springen können, das Loch wird frei beweglich.



# PN Übergang - Diode



# Diode Ventilfunktion

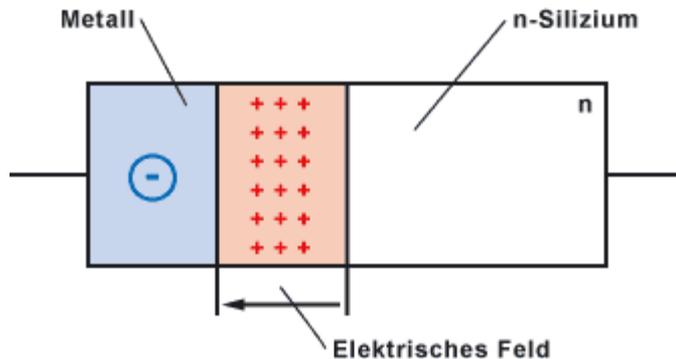


Liegt die n-dotierte Seite am Pluspol, so wandern Elektronen und Löcher wegen des el. Feldes jeweils nach außen. Die Übergangszone verbreitert sich, es fließt nur ein geringer Strom.

Liegt die n-dotierte Seite am Minuspol, so wandern die Majoritätsträger in die Übergangszone. Der pn-Übergang wird dadurch leitend.

Der pn-Übergang hat Ventilwirkung. Er sperrt den Stromdurchgang, wenn der Minuspol der Spannungsquelle am p-Leiter liegt, er ist leitend (stromdurchlässig), wenn der Pluspol am p-Leiter liegt.

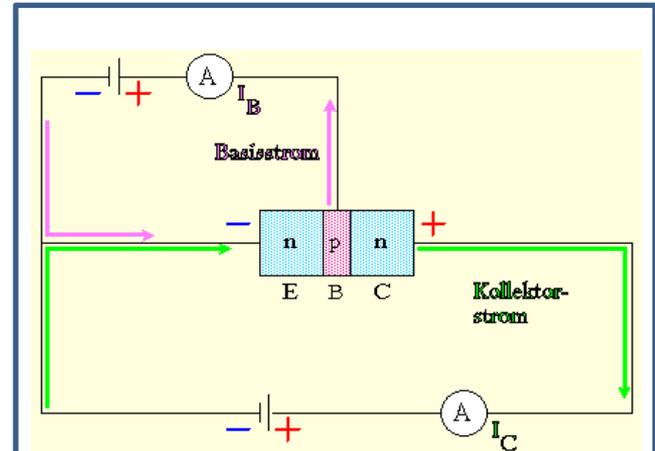
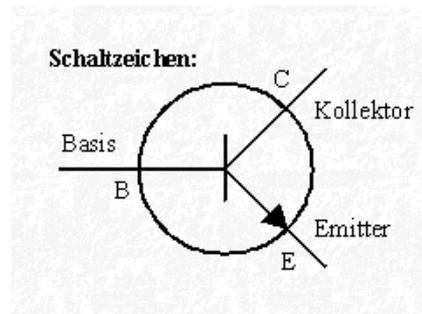
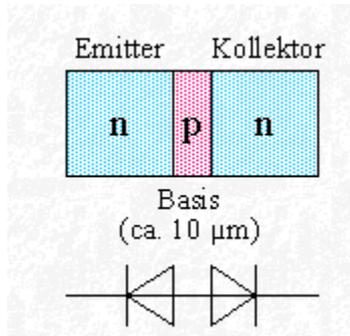
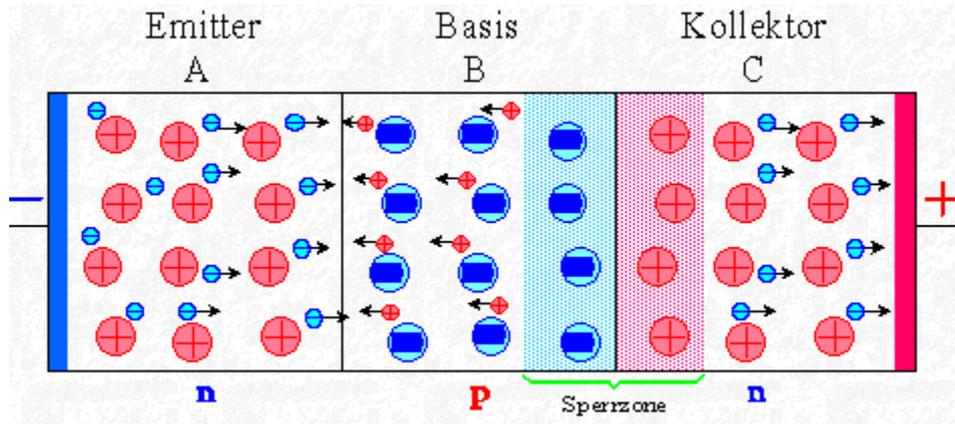
# Schottky- Diode



Die Schottky-Diode besteht aus einer Metall-Schicht und einer n-leitenden Silizium-Schicht. Die Elektronen der n-Schicht wandern zur Metallschicht. Weil Elektronen leichter aus n-Silizium in die Metallschicht gelangen als umgekehrt, entsteht in der Silizium-Schicht ein an Elektronen verarmter Bereich, eine Raumladungszone die sogenannte Schottky-Sperrschicht.

Schaltet man die Schottky-Diode in Durchlassrichtung, wird die Raumladungszone freigeräumt. Die Elektronen fließen von der n-Schicht in die Metallschicht. Das Schalten vom Durchlasszustand in den Sperrzustand bzw. umgekehrt erfolgt sehr schnell. Es müssen keine Minderheitsladungsträger (Löcher) ausgeräumt werden.

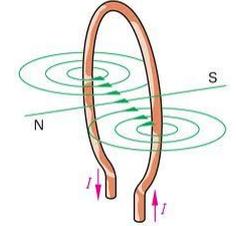
# NPN Transistor



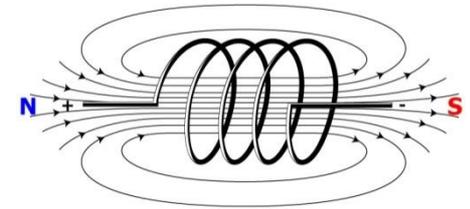
Legt man an den Emitter und an die Basis (Pluspol) eine Spannung an, so können Elektronen durch die B/C-Schicht diffundieren, es fließt ein Basisstrom und ein Kollektorstrom.

# Spule - Induktivität

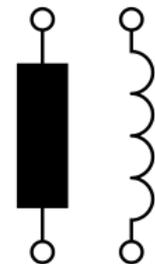
Fließt ein Strom  $i$  durch einen Leiter entstehen konzentrische Feldlinien um den Leiter. Eine klassische **Spule** ist ein Leiter (Draht), der auf einen Wickelkörper mit oder ohne Kern schraubenförmig aufgewickelt ist.



Die Haupteigenschaft von Spulen ist deren Induktivität. Die Induktivität ergibt sich aus der Anzahl Windungen der Spule sowie aus dem von der Spule eingeschlossenem Material und den Abmessungen. Durch die magnetische Verkettung der einzelnen Windungen untereinander steigt die Induktivität von gewickelten Spulen im Quadrat mit der Windungszahl. Eine Verdoppelung der Windungszahl bei gleichen geometrischen Abmessungen bewirkt somit eine Vervielfachung der Induktivität.



Wird der Spulendraht von einem sich zeitlich ändernden Strom durchflossen, so entsteht um den elektrischen Leiter ein sich zeitlich ändernder magnetischer Fluss. Jede Änderung des Stromes erzeugt an den Enden des elektrischen Leiters eine Selbstinduktionsspannung. Diese Spannung ist dabei so gerichtet, dass sie ihrer Ursache (dem Strom) entgegen wirkt (Lenzsche Regel).

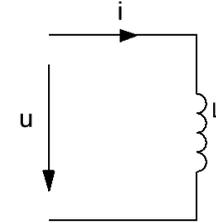


Schaltzeichen einer Spule

Die Gesamtzahl der magnetischen Feldlinien wird als „magnetischer Fluss“ bezeichnet. Formelzeichen  $\Phi$  (Phi).  $\Phi = (L \times I) / \text{Windungszahl } N$

# Induktionsgesetz – Induktivität L

Ändert sich der Strom in einer Spule, so wird eine Spannung  $u$  induziert, die der Änderung des Stroms entgegenwirkt.



Induktionsgesetz

für die Selbstinduktionsspannung  $u$  einer Spule gilt:

Die Konstante  $L$  heißt Induktivität der Spule

$$u = L \frac{di}{dt}$$

$di/dt$  = Änderung des Stromes  $i$  durch die Spule in der Zeit  $dt$

Die Einheit der Induktivität ist  $1\text{Vs/A}$  und wird als Henry (H) bezeichnet. Eine Spule hat eine Induktivität von 1 Henry, wenn bei einer Stromänderung von 1 Ampere in 1 Sekunde eine Selbstinduktionsspannung von 1 Volt entsteht.

Strom durch ein (verlustlose) Spule:

$$i = \frac{1}{L} \int u dt$$

Energie in einer Spule:

$$W = \frac{1}{2} L i^2$$

# Selbstinduktion

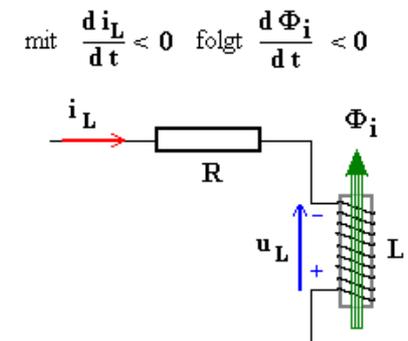
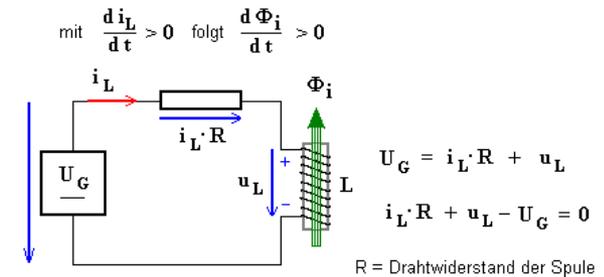
Fließt ein sich ändernder Strom durch eine Spule, so erzeugt diese ein sich änderndes Magnetfeld. Nach dem Induktionsgesetz bewirkt dabei der nicht konstante magnetische Fluss der Spule eine Induktionsspannung. Die Spule reagiert auf ihr eigenes Magnetfeld ebenso wie auf eine magnetische Fremderregung. Ihr Magnetfeld induziert in ihr selbst eine Spannung. Dieser Vorgang wird Selbstinduktion genannt. Die Spannung ist die Selbstinduktionsspannung. Ist die Stromänderung im Zeitintervall positiv, also größer null, so ist die Magnetflussänderung auch positiv. Die Induktionsspannung über der Spule nimmt zu. Zum Aufbau des Magnetfeldes entnimmt die Spule dem Stromkreis Energie. Sie ist vergleichbar mit einem Lastwiderstand bei dem Strom und Spannung die gleiche Richtung haben.

Die Generatorspannung, die den Strom zur Magnetfelderzeugung liefert, und die dadurch erzeugte Selbstinduktionsspannung sind einander entgegengerichtet. Die Gegenspannung der Spule wirkt dem Stromanstieg entgegen und versucht den Magnetfeldaufbau zu schwächen. Die Selbstinduktionsspannung ist positiv.

Ist die Spule an einem Gleichspannungsgenerator angeschlossen, wird nach vollständigem Aufbau des Magnetfeldes die Stromänderung im Zeitintervall gegen null gehen. Die Magnetflussänderung geht dann ebenfalls gegen null. Im statischen Magnetfeld hat dann auch die Selbstinduktionsspannung den Wert null. Der im Stromkreis fließende konstante Strom ist nach dem ohmschen Gesetz nur noch von der Generatorspannung und dem Drahtwiderstand der Spule abhängig.

Nimmt der Strom jetzt ab, so ist die Stromänderung im Zeitintervall negativ und kleiner Null. Die resultierende Magnetflussänderung ist ebenfalls kleiner und die Energie des aufgebauten Spulenmagnetfeldes wird frei. Der 2. Kirchhofsche Satz muss erfüllt bleiben, folglich ist die Spannungssumme null und die Spannungspfeile ändern ihre Richtung.

Die Spule als Generator will den zuvor herrschenden Stromfluss aufrecht erhalten. Im Generator sind Strom- und Spannungsrichtung entgegengesetzt. Die Induktionsspannung ist bei abnehmender Magnetflussänderung dem Spulenstrom entgegengerichtet. Die Polarität der Selbstinduktionsspannung ist negativ.



Beim Magnetfeldaufbau ist die Selbstinduktionsspannung positiv.  $u_L = L \cdot (+di / dt)$   
 Beim Magnetfeldabbau ist die Selbstinduktionsspannung negativ.  $u_L = L \cdot (-di / dt)$

# Reale, verlustbehaftete Spule

Schaltet man eine reale (das heißt: verlustbehaftete) Spule an eine Gleichspannung, nehmen Strom sowie Spannung folgenden zeitlichen Verlauf:

- beim Einschaltvorgang:

$$i_L(t) = I_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = \frac{U_0}{R_L} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t \cdot R_L}{L}}\right)$$

$$u_L(t) = \hat{u} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = \hat{u} \cdot e^{-\frac{t \cdot R_L}{L}}$$

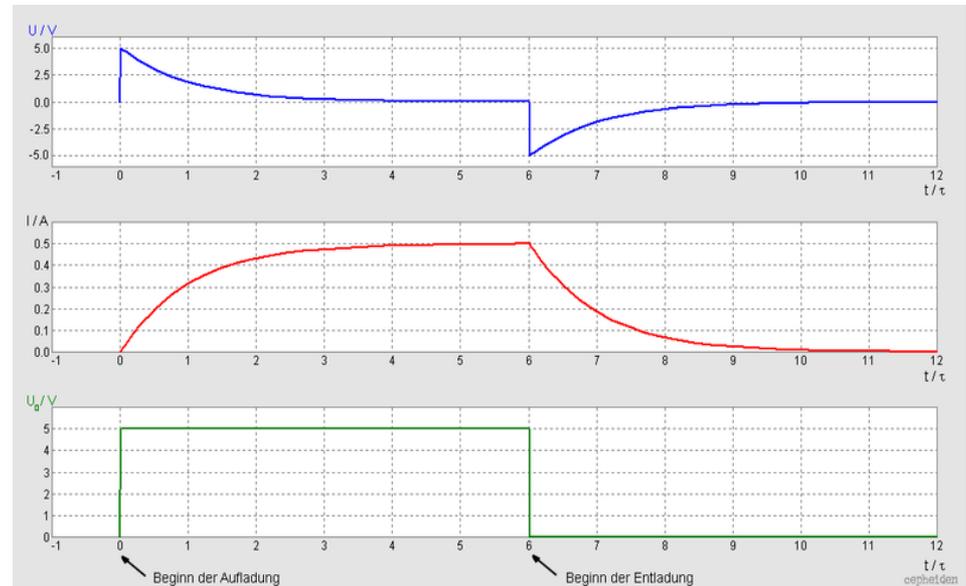
- beim Ausschaltvorgang:

$$i_L(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{U_0}{R_L} \cdot e^{-\frac{t \cdot R_L}{L}}$$

$$u_L(t) = -\hat{u} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = -\hat{u} \cdot e^{-\frac{t \cdot R_L}{L}}$$

mit:

- $\tau = \frac{L}{R}$  (Zeitkonstante)
- $L$  – Induktivität der Spule
- $t$  – Zeit
- $R_L$  – ohmscher (Draht-)Widerstand der Spule
- $I_0 = \frac{U_0}{R_L}$
- $U_0$  – Gleichspannung



Dieser Zusammenhang zeigt, dass sich der in einer Spule fließende Strom nicht sprunghaft ändern kann. Beim Einschalten eines Gleichstromkreises mit einer Spule verhindert die der Betriebsspannung entgegenwirkende Induktionsspannung einen raschen Stromanstieg. Dieser folgt den Gesetzen einer **Exponentialfunktion**. Wenn  $R_L$  einen *hohen* Wert annimmt, wird  $\tau$  *kleiner*, somit ist der Stromanstieg auf den Endwert  $I_0$  eher abgeschlossen.

Ein plötzliches Abschalten des Spulenstromes ( $-\frac{di}{dt} \rightarrow \infty$ ) ist nicht möglich. In der Realität entsteht beim Versuch, den Strom zu unterbrechen, eine Spannungsspitze *umgekehrter* Polarität, deren Höhe nur von der parasitären Kapazität der Spule und anderen spannungsbegrenzenden Effekten (**elektrischer Durchbruch**, Überschläge, **Schaltlichtbogen**) abhängt. Sie können Schäden durch Überspannung verursachen.

# Induktiver Widerstand - Herleitung

## 14.1.2 Induktiver Blindwiderstand

Die Induktivität  $L$  beschreibt die Bauelemente-Kenngröße einer idealen Spule.

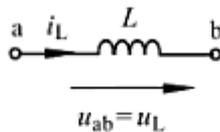


Bild 14.4: Induktivität im Wechselstromkreis

Das Induktionsgesetz [Gleich. (11.26)] beschreibt im magnetischen Feld den Zusammenhang zwischen der zeitlichen Änderung des Stromes als Ursache und der induzierten Spannung als Wirkung. Zur **Herleitung** der Strom-Spannungs-Beziehung einer Induktivität im Wechselstromkreis wird hier demzufolge der Strom mit  $i_L = \hat{I} \cdot \sin \omega t$  als eingespeiste Größe und damit als Bezugsgröße ( $\varphi_i = 0$ ) gewählt und in das Induktionsgesetz (11.26\_a) eingesetzt.

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} = L \frac{d\hat{I} \cdot \sin \omega t}{dt} = \omega L \cdot \hat{I} \cos \omega t$$

Addiert man einen Winkel von  $90^\circ$  zum Argument der  $\cos$ -Funktion, kann die Spannung  $u_L$  in eine  $\sin$ -Funktion umgerechnet und mit der allgemeinen Funktionsbeschreibung einer sinusförmigen Wechselspannung verglichen werden.

$$u_L = \frac{\omega L \cdot \hat{I} \cdot \sin(\omega t + 90^\circ)}{\downarrow \quad \downarrow}$$

$$u = \hat{U} \cdot \sin(\omega t + \varphi_u)$$

Aus dem Vergleich ( $\downarrow$ ) erhält man eine Aussage zum Scheinwiderstand dieses (vorerst als ideal angenommenen) Bauelementes im Wechselstromkreis.

Es gilt:  $\hat{U} = \omega L \cdot \hat{I}$  bzw.:

$$Z_L = \frac{\hat{U}}{\hat{I}} = \frac{U}{I} = \omega L \quad (14.3)$$

Diese Widerstandskomponente wird als **induktiver Blindwiderstand** bezeichnet. Der Name steht in einem engen Zusammenhang mit der von Blindwiderständen verursachten **Blindleistung** (vgl. Kap.17).

Aus dem Vergleich der Argumente o.g. Funktionsverläufe kann eine Aussage zur Phasenverschiebung abgeleitet werden, die ein **induktiver** Blindwiderstand zwischen Spannung und Strom verursacht.

Es gilt:  $\varphi_u = +90^\circ$  bzw.:

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i = +90^\circ \quad (14.4)$$

Der induktive Blindwiderstand  $\omega L$  ist frequenzabhängig. Er verursacht eine Phasenverschiebung in der Art, dass der Spannungszeiger dem Stromzeiger um  $90^\circ$  vorausleitet (positiver Phasenwinkel).