Praktikumversuch ST 4

STROMVERSORGUNG

1. Versuchsziel

Ziel des Versuches ist die Vertiefung der Kenntnisse der Verfahren und Grundschaltungen bei der Stromversorgung von elektronischen Geräten.

Ausgehend von der Dimensionierung der einzelnen Schaltungen sollen Probleme erkannt werden, die für die Konzipierung von Stromversorgungen von besonderer Bedeutung sind.

2. Grundlagen

2.1. Allgemeines

Aufgabe von Stromversorgungseinheiten ist die Bereitstellung der zum Betrieb elektrischer und elektronischer Funktionseinheiten benötigten Hilfsenergie - in der Regel Gleichspannungen - aus dem Wechselstromnetz oder aus Batterien. Eingangs- und Ausgangsgröße kann eine Wechsel- oder Gleichgröße sein. Deshalb ist zwischen vier Gruppen von Stromversorgungsgeräten zu unterscheiden (Transformator, Wechselrichter, Gleichrichter, Transverter). Die größte Bedeutung haben Netzteile. Sie wandeln eine mittels Netztransformator herunter transformierte Wechselspannung (10...30V) in eine oder mehrere Ausgangsspannungen um. Die Ausgangsspannung soll unabhängig von Netzspannungs-, Belastungs- und Temperaturänderung sein. Deshalb werden häufig elektronische Regelschaltungen verwendet. In den letzten Jahren nehmen Netzteile in „klassischer" Schaltungstechnik einen immer größeren relativen Anteil des Volumens und der Masse in elektronischen Geräten ein. Deshalb werden in zunehmenden Maße unkonventionelle Verfahren, z.B. Schaltregler und netztransformatorlose Stromversorgungen, verwendet. Bei „klassischen" Stromversorgungen sind Volumen und Masse durch den verhältnismäßig großen Netztransformator bestimmt (abhängig von der Ausgangsleistung).

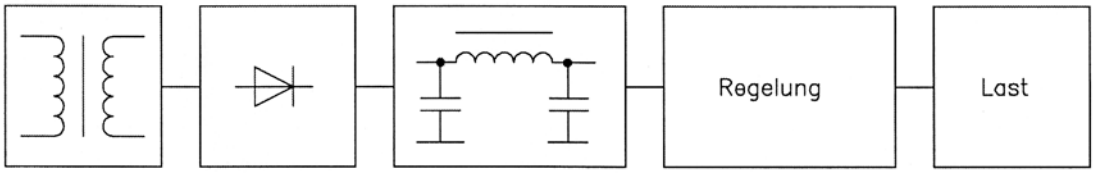


Abb. 1 Ein möglicher Aufbau

2.2. Der Netztransformator

Er bewirkt:

- die Transformation der Wechselspannung auf die von der Gleichrichterschaltung benötigten Spannungswert
- die galvanische Trennung vom Netz

Entsprechend der Geometrie der Kernbleche unterscheidet man die verschiedenen Transformatortypen. Die für die Berechnung des Transformators notwendigen Angaben sind der Literatur /1/ zu entnehmen.

2.3. Die Gleichrichtung

2.3.1. Die Einweggleichrichtung

Kennzeichen der Einweggleichrichtung ist, dass nur eine der beiden Halbwellen einen Stromfluss durch den Lastwiderstand bzw. durch die Glättungskapazität bewirkt.

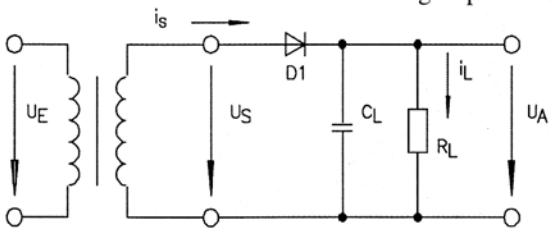


Abb. 2 Schaltung der Einweggleichrichtung

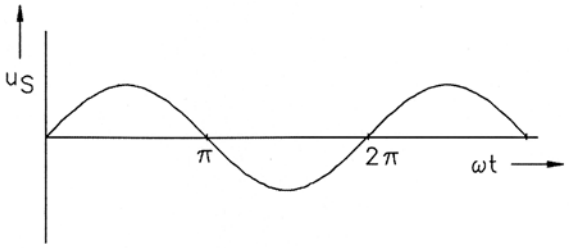


Abb. 3 Spannungsverlauf am Trafoausgang

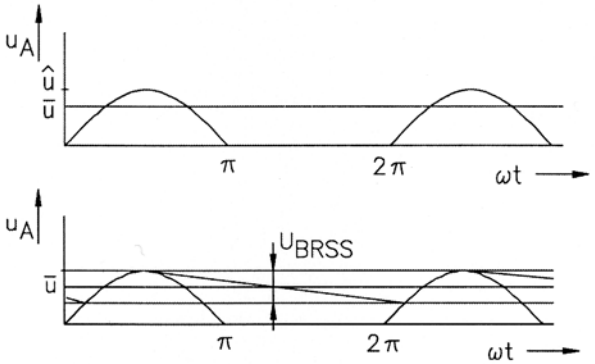


Abb. 4 Charakteristische Signalverläufe der Einweggleichrichtung

2.3.2. Die Zweiweggleichrichtung

Bei dieser Gleichrichtungsart bewirken beide Halbwellen einen Stromfluss durch die Glättungskapazität bzw. durch den Lastwiderstand.

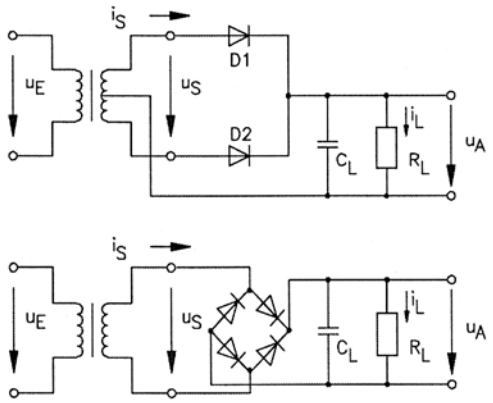


Abb. 5 Schaltungsmöglichkeiten der Zweiweggleichrichtung

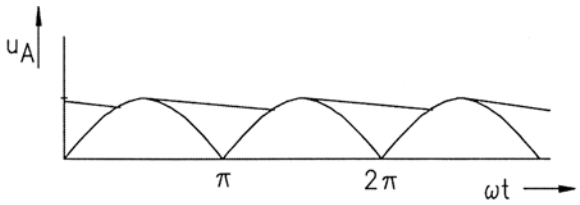


Abb. 6 Signalverlauf am Ausgang

Vereinfacht unter Vernachlässigung des Innenwiderstandes von Trafo und Diode ergibt sich:

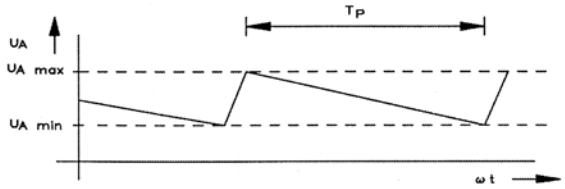


Abb. 7 Vereinfachter Signalverlauf am Ausgang

- $\Delta U_A = U_{A\max} - U_{A\min} = (T_P \cdot i_L) / C_L$
- $T_P \approx 20ms$ bei Einweggleichrichtung
- $T_P \approx 10ms$ bei Zweiweggleichrichtung

2.3.3. Spannungsvervielfacherschaltung

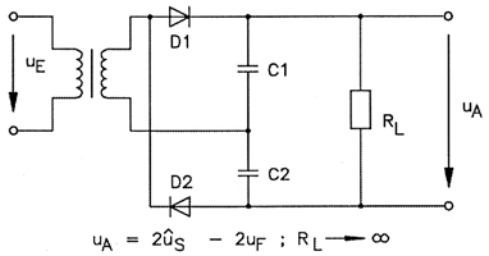


Abb. 8 Spannungsverdopplerschaltung (doppelte Einwegschaltung nach DELON und GREINACHER)

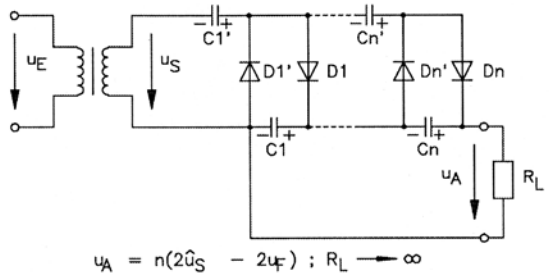


Abb. 9 Spannungsvervielfacherschaltung (Kaskadenschaltung nach VILLARD)

2.4. Siebglieder

2.4.1. Das RC-Siebglied

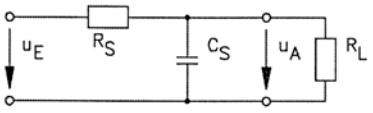


Abb. 10 Schaltung des RC-Siebgliedes

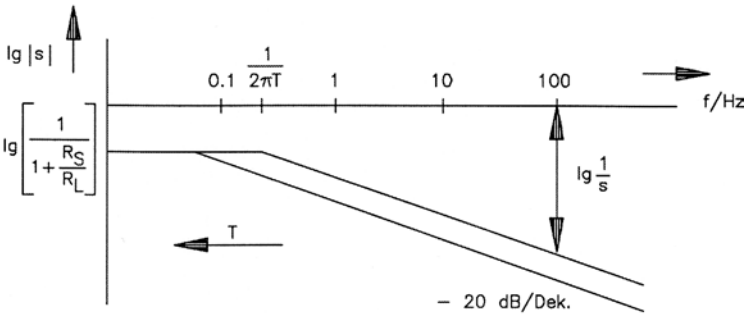


Abb. 11 Bodediagramm des RC-Siebgliedes

$$T = R_S \parallel R_L \cdot C_S$$

Siebfaktor:

$$S = \frac{R_S + (R_L \parallel \frac{1}{j\omega C_S})}{(R_L \parallel \frac{1}{j\omega C_S})} \approx \omega \cdot R_S \cdot C_S$$

2.4.2. Das LC-Siebglied

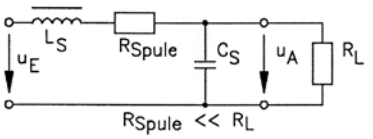


Abb. 12 Schaltung des LC-Siebgliedes

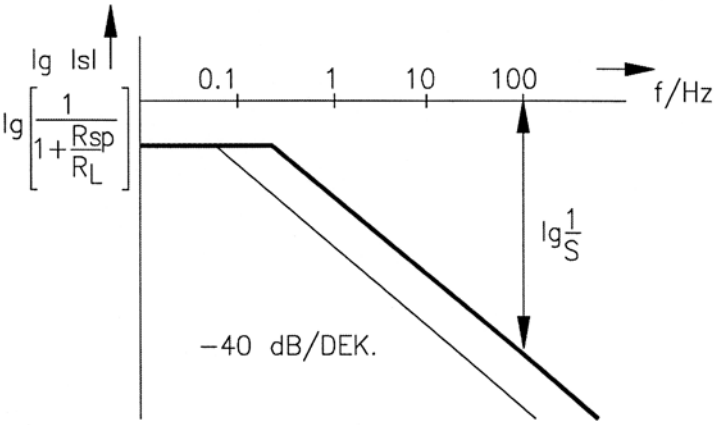


Abb. 13 Bodediagramm des LC-Siebgliedes

Siebfaktor:

$$S = \frac{j\omega L + R_{Spule} + (R_L \parallel \frac{1}{j\omega C_S})}{R_L \parallel \frac{1}{j\omega C_S}} \approx \omega^2 \cdot L \cdot C_S$$

2.4.3. Das Transistorsiebglied

Vergleich mit dem RC-Siebglied, Betrachtung der Gleichspannungsabfälle:

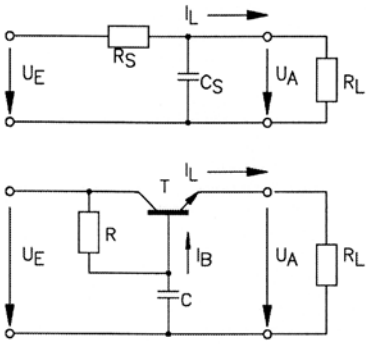


Abb. 14 RC- und Transistorsiebglied

Für das Transistorsiebglied gilt:

$$\Delta U = U_E - U_A$$
$$\Delta U = R \cdot I_B + U_{BE}$$
$$\Delta U = R \cdot \frac{I_L}{\beta} + U_{BE}$$

Für das RC-Siebglied gilt:

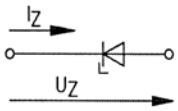
$$\Delta U = U_E - U_A$$
$$\Delta U = R_S \cdot I_L$$

Der Gleichspannungsabfall über dem Transistorsiebglied ist damit kleiner als über dem RC-Siebglied (bei $R = R_S$).

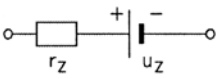
2.5. Stabilisierungsschaltungen

2.5.1. Ohne Regelung (mit Z-Diode)

Symbol:



Ersatzschaltung für den Z- Bereich:



Definition des differentiellen Widerstandes r_Z:

$$r_Z = \frac{dU_Z}{dI_Z}$$

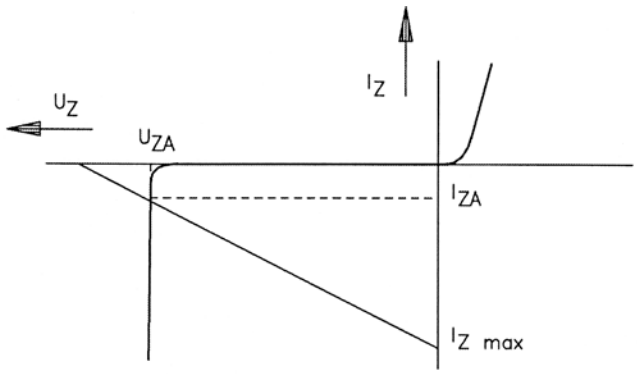


Abb. 15 Statische Kennlinie der Z-Diode

Abhängigkeit des differentiellen Widerstandes r_Z vom Z-Strom I_Z, sowie der Z-Spannung U_Z am Beispiel realer Z-Dioden.

TYPE	$U_Z(V)$ $(I_Z = 5mA)$	r_Z (Ω)	TK_{UZ} $(\%K^{-1})$
SZX 19/5,6	5,2 ... 6,0	< 60	-0,03 ... 0,05
SZX 19/7,5	7,0 ... 7,9	< 7	0,02 ... 0,07
SZX 19/24	22,8 ... 28,9	< 80	0,08 ... 0,1

$$r_Z = f(I_Z, U_Z)$$

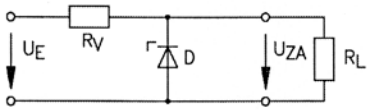


Abb. 16 Stabilisierungsschaltung mit Z-Diode

Stabilisierungsfaktor:

$$\frac{\Delta U_E}{\Delta U_A} = 1 + \frac{R_V}{r_Z}$$

für $(R_L \to \infty)$ $\quad \dfrac{\Delta U_E}{\Delta U_A} \approx \dfrac{R_V}{r_Z}$

$$R_{V\max} \geq \frac{U_{E\min} - U_Z}{I_{L\max} + I_{Z\min}} \quad ; \quad R_{V\min} \leq \frac{U_{E\max} - U_Z}{I_{Z\max} + I_{L\min}}$$

Da der Wirkungsgrad bei dieser Stabilisierungsart gering ist (<50%), werden zur Stabilisierung größerer Leistungen geregelte Stabilisierungsschaltungen eingesetzt.

2.5.2. Mit Regelung (Längsregler)

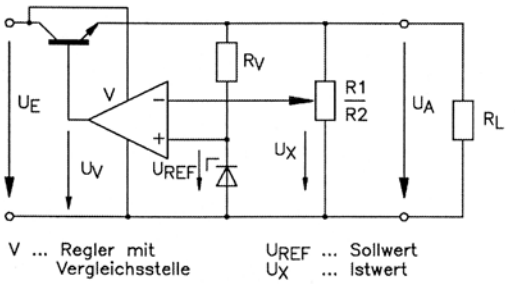


Abb. 17 Spannungsstabilisierung mit Stellglied in Reihe zur Last

Für die Ausgangsspannung ergibt sich:

$$U_A \approx U_{REF} \cdot (1 + \frac{R1}{R2})$$

Bei der stetigen Regelung überwiegt das Prinzip, dass Stellglied in Reihe zur Last zu schalten.
Für den Transistor gilt:

$$U_{CE\max zul.} \geq U_{E\max} - U_{A\min}$$

2.5.3. Überlastschutz

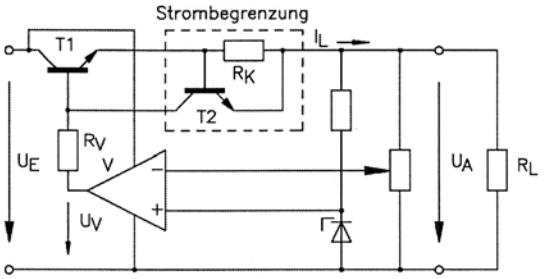


Abb. 18 Überlastschutz durch Strombegrenzung

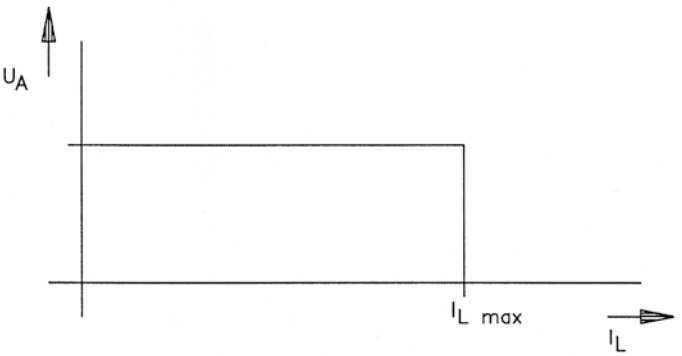


Abb. 19 Strom- und Spannungsverläufe beim Überlastschutz (ideal)

Wirksame elektronische Sicherungen schalten beim überschreiten des zulässigen Laststromes den gefährdeten Transistor ab, bzw. begrenzen den Laststrom.

Wirkungsweise:

- mit steigendem I_L wird der Spannungsabfall über R_K größer
- T2 wird leitend, wenn gilt:

$$I_{L\max} \cdot R_K = U_{BE2}$$

- der Basisstrom von T1 wird über T2 abgeleitet und dadurch der Laststrom (Stromregelung) beeinflusst

$$P_{V\,dyn} = f(t_P)$$

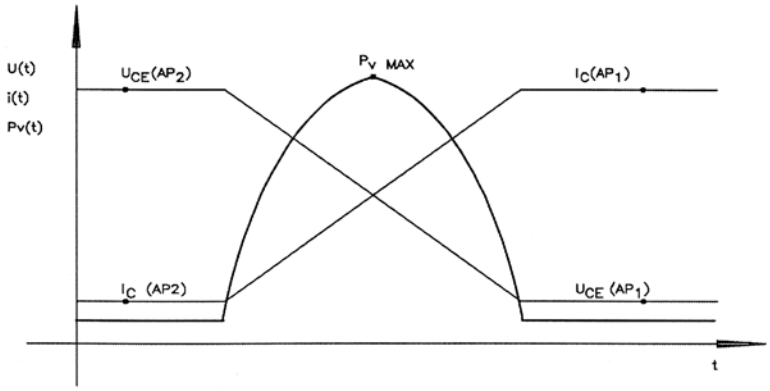


Abb. 31 Charakteristische Signal- und Leistungsverläufe

Die Gesamtverlustleistung ist die Summe von statischer und dynamischer Verlustleistung.

$$P_V = P_{V\,dyn} + P_{V\,stat}$$

2.7.4. Das SOAR-Diagramm (safe operating area)

Da ein Schaltransistor in Schaltnetzwerken sehr hohen elektrischen Beanspruchungen unterliegt, muss man seine Grenzwerte genau analysieren. Eine Hilfe bietet hier das SOAR-Diagramm. Es ermöglicht eine genaue Betrachtung der zulässigen Grenzwerte (U_{CE} , I_C) bei geforderter Arbeitsweise (Lit. /1/ S.555).

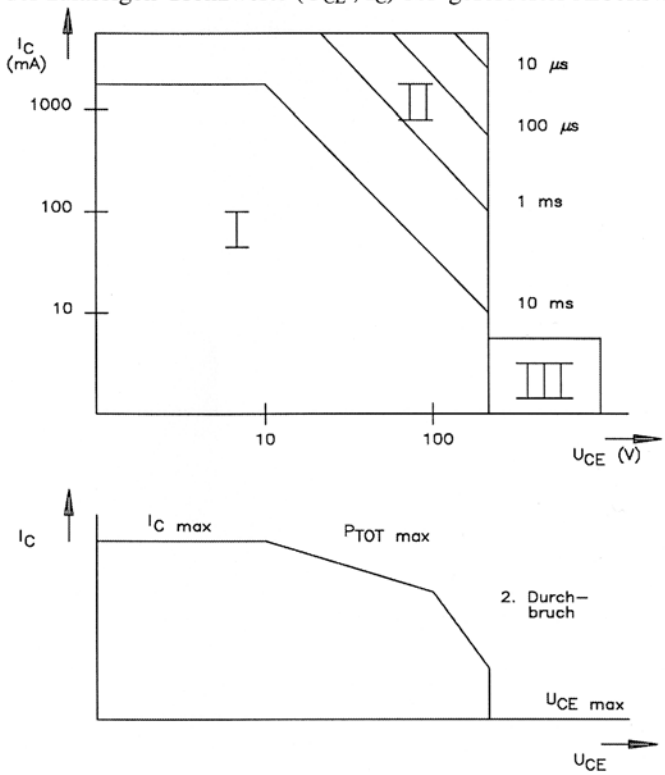


Abb. 32 SOAR-Diagramm für SU 165

Bereich 1: - Gleichstrombetrieb

Bereich 2: - periodischer Impulsbetrieb mit $V_T = t_e / T = 0{,}01$

Bereich 3: - periodischer Impulsbetrieb mit $V_T =< 0{,}25$

Statisches Verhalten:

Ein Transistor mit einer bestimmten zulässigen Verlustleistung P_V kann im Schalterbetrieb (unstetige Arbeitsweise) eine wesentlich größere Leistung verarbeiten als im Verstärkerbetrieb (stetige Arbeitsweise), weil sowohl im gesperrten als auch im eingeschalteten Zustand die im Bauelement entstehende Verlustleistung sehr klein ist.

$$\eta = \frac{P_V}{P_V + P_A} \cdot 100\% \approx 1$$

P_A: geschaltete Leistung

$$P_A >> P_V$$

P_V: Verlustleistung

$$\eta \approx 1 - \frac{U_{CEX}}{U_{CC}}$$

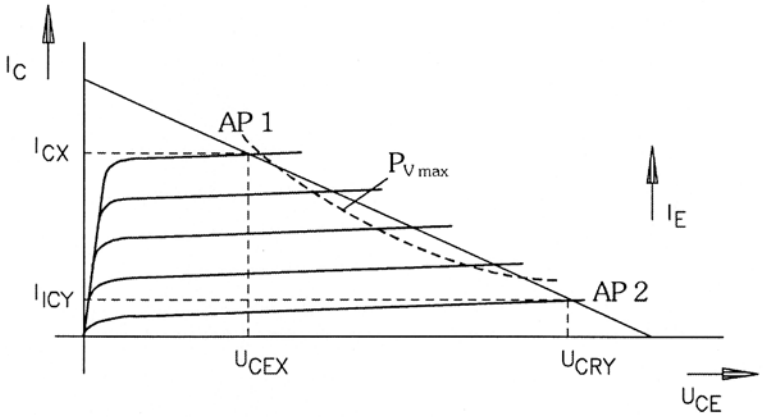


Abb. 29 Arbeitspunkte im Kennlinienfeld des Bipolartransistors

Dynamisches Verhalten:

Bei Transistoren die als Schalter verwendet werden, ist insbesondere die Speicherzeit t_S von sehr großer Bedeutung.

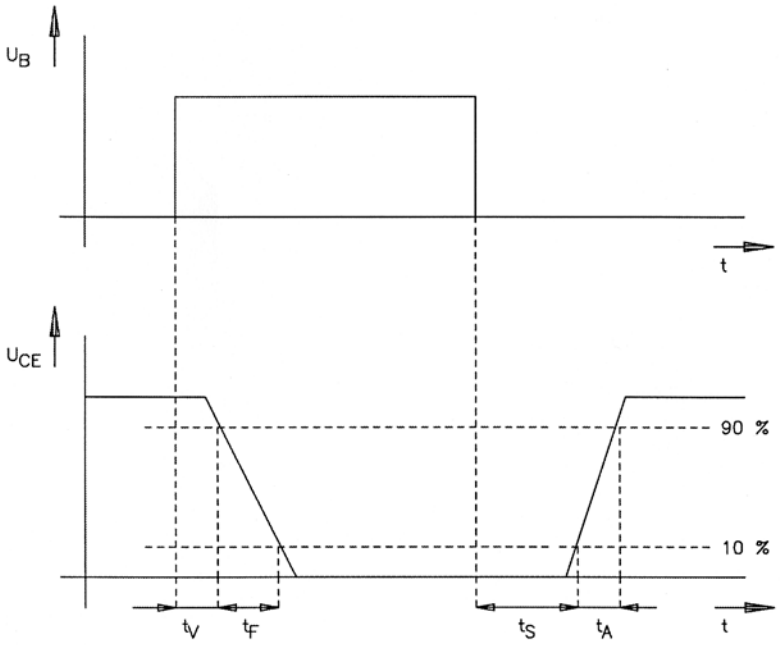


Abb. 30 Zeitverhalten im Schalterbetrieb

$$t_S > t_F, t_V, t_A$$

Um den Einfluss der dynamischen Verlustleistung gering zu halten, müssen t_V, t_F , t_S und t_A deutlich kleiner sein als die Zeitspanne zwischen zwei Umschaltungen (t_P).

Funktion: - Erzeugung von negativen Ausgangsspannungen (- 2 ... - 10 V) aus positiven Eingangsspannungen

Wirkprinzip: - S1 und S2 sind geschlossen, C1 wird auf U_E aufgeladen
- S1 und S2 sind geöffnet, S3 und S4 sind geschlossen, Ladung von C1 wird auf C2 übertragen

2.7. Schaltnetzteile

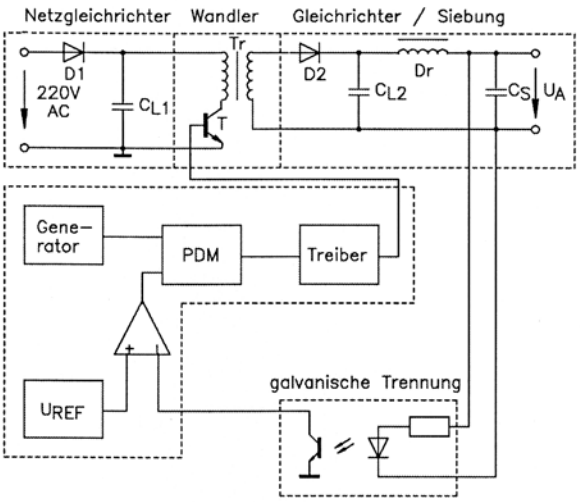


Abb. 27 Aufbau eines Schaltnetzteiles

Wirkprinzip:

- Netzspannung wird direkt gleichgerichtet und mit einem Ladekondensator geglättet
- ein Schalttransistor zerhackt diese Gleichspannung von 200 ... 350 V in eine periodische Rechteckimpulsfolge
- diese wird in einem Ferritübertrager entsprechend dem Übersetzungsverhältnis transformiert und dann wieder gleichgerichtet und gesiebt
- das Tastverhältnis der Impulsfolge bestimmt die Ausgangsspannung U_A

2.7.2. Gleichspannungswandler

Sperrwandler:

- die Energie wird in der Sperrphase des Schaltransistor in den Ausgang übertragen
- Zwischenspeicherung der Energie

Durchflusswandler:

- Energie wird bei leitendem Schaltransistor übertragen
- Primärstrom und Sekundärstrom fließen gleichzeitig über die Diode und Speicherdrossel
- großer Aufwand, aber kleine Welligkeit von U_A

2.7.3. Der Transistor als Schalter

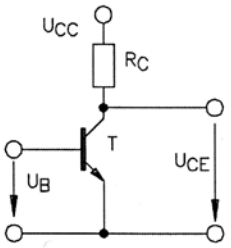


Abb. 28 Transistor als Schalter

2.6.3. Der Spannungsinverter ($U_A = -U_E$)

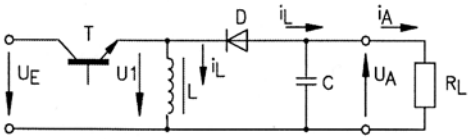


Abb. 24 Schaltungstechnische Realisierung

Arbeitsweise:

Bei leitendem Transistor wird Energie in der Drossel gespeichert. Bei gesperrtem Transistor wird diese Energie zum Kondensator und zum Lastwiderstand übertragen. Die Ausgangsspannung besitzt umgekehrte Polarität.

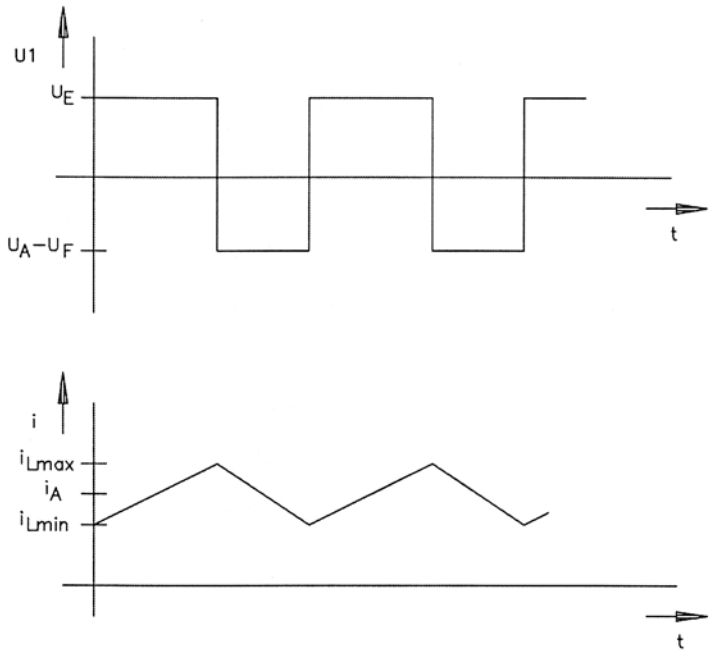


Abb. 25 Signalverläufe des Spannungsinverters

2.6.4. Eisenloser Spannungsinverter (ICL 7660)

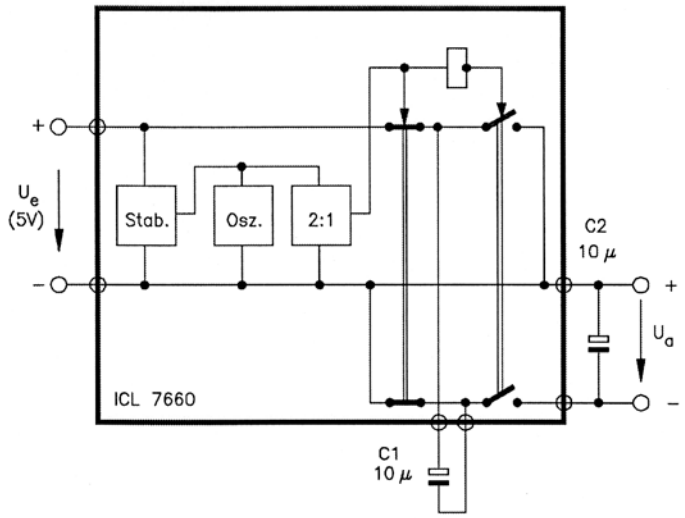


Abb. 26 Aufbau des Spannungsinverters ICL 7660

Berechnung des Kernes:

Der Spulenkern darf bei maximaler Ausgangsleistung nicht in die Sättigung gelangen. Die relative Permeabilität würde sich verringern und die gewünschte Arbeitsweise könnte nicht aufrechterhalten werden.
Man verwendet daher meist Ferritkerne mit Luftspalt bzw. Schnittbandkerne.

Der maximale Strom:

Der maximale Drosselstrom $I_{L\,max}$ der auch durch den Schalttransistor und die Freilaufdiode fließt hat den Wert:

$$I_{L\max} = I_A + I_{A\min}$$

$$I_{A\min} = \frac{I_L}{2}$$

Berechnung der Induktion im Kern:

$$U_L = N \cdot (\frac{d\phi}{dt})$$

$$\Rightarrow \quad \hat{B} = \frac{U_E - U_A - U_{CE\,sat}}{N \cdot A_{Fe} \cdot (1 - I_{EL} / I_{EH})} \cdot t$$

2.6.2. Der Aufwärtsregler ($U_A > U_E$)

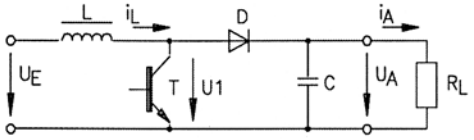


Abb. 22 Schaltungstechnische Realisierung

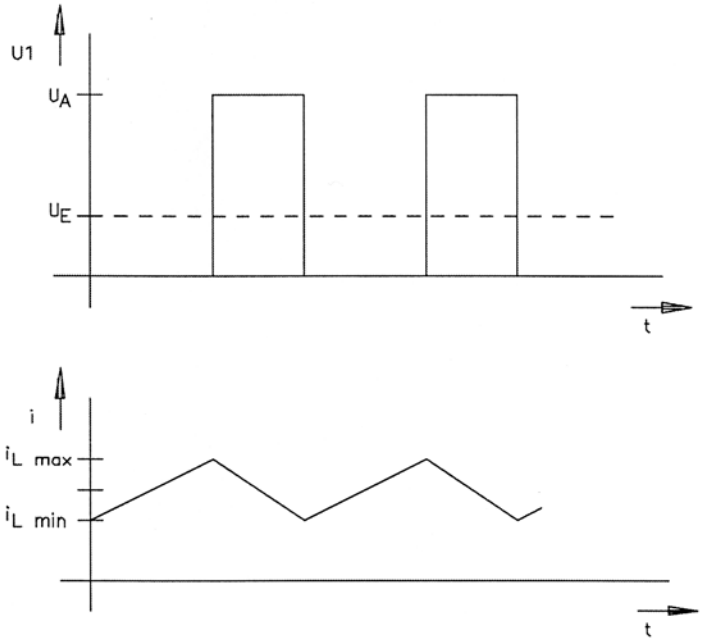


Abb. 23 Signalverläufe

2.6. Gleichspannungswandler (DC/DC Konverter)

2.6.1. Abwärtsregler ($U_A < U_E$)

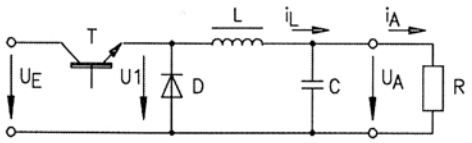


Abb. 20 Schaltungstechnische Realisierung

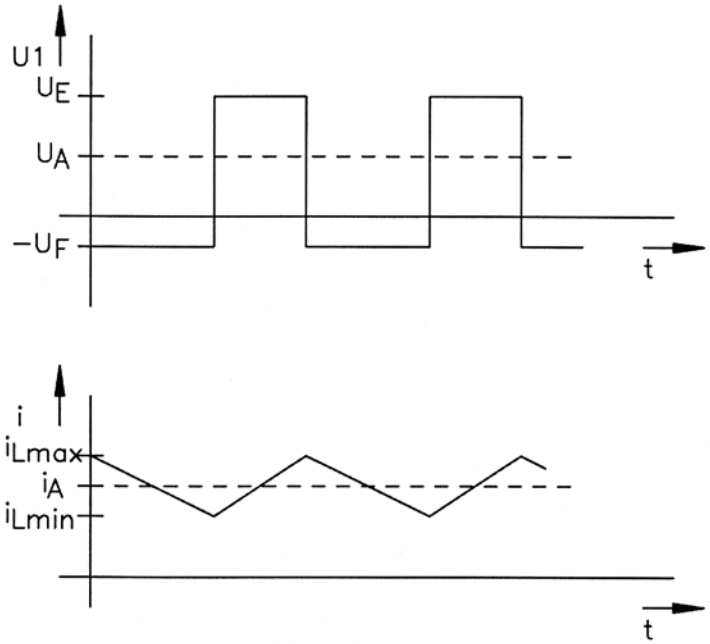


Abb. 21 Signalverläufe

Der Wirkungsgrad von geregelten Stromversorgungseinheiten hängt entscheidend von der im Stellglied entstehenden Verlustleistung ab. Deshalb wird hier der Transistor im Schaltbetrieb verwendet, um die Verluste zu reduzieren. Er wird periodisch ein- und ausgeschaltet.
Die Schaltfrequenz liegt bei ca. 16 ... 200 kHz. Die Ansteuerschaltungen von Schaltreglern sind relativ aufwendig. Deshalb werden meist integrierte Ansteuerschaltungen eingesetzt.

Funktion:

- T ist eingeschaltet, U_E liegt bei Vernachlässigung von $U_{CE\,SAT}$ direkt am LC-Filter an
- Drosselstrom I_L steigt linear an und in der Drossel wird Energie gespeichert
- T wird gesperrt, die Energie wird über die Freilaufdiode D an die Last abgegeben
- die Freilaufdiode D bewirkt, dass der Strom I_L in der vorigen Richtung weiterfließen kann
- in der Sperrphase trägt damit nicht nur der Kondensator C_0 , sondern auch die Speicherdrossel L zum Ausgangsstrom bei

Berechnung der Drosselinduktivität:
(Ziel: kein „lückender" Drosselstrom)

Stromänderung in der Drossel beim Schalten:

$$\Delta I_L = I_{L\max} - I_{L\min} = \frac{U_E - U_{CE\,sat} - U_A}{L} \cdot t_{ein}$$

$$\textit{für}: \quad (U_{CE\,sat} \quad \textit{und} \quad U_F \to 0)$$

$$L_{\min} = (1 - \frac{U_A}{U_{E\max}}) \cdot T \cdot \frac{U_A}{2 I_{A\min}}$$

3. Versuchsaufgaben

3.1. Netzteil

1. Aufgabe: Vergleichen Sie die Spannungen U_1 am Ausgang des Gleichrichters bei Einweggleichrichtung und Zweiweggleichrichtung ohne und mit Ladekondensator. Skizzieren Sie die Oszillogramme des Stromes $i_{GL}(t)$ und der Spannung $u_1(t)$.

Sekundärspannung	U_{SEK}	= 24 V
Ladekondensator	C_L	= 470 µF
Laststrom	I_L	= 0,5 A

Die Oszillografeneingänge sind auf „DC" zu stellen. $u_1(t)$ wird mit Kanal A oszillografiert.

Zur Aufnahme des Stromverlaufes $i_{GL}(t)$ wird ein eingebauter Strom/Spannungswandler benutzt, dessen Ausgangsspannung an der Buchse I_{GL} abgenommen werden kann.

Die Wandlerkonstante „k" beträgt - 0,1 V/A. Um eine vorzeichenrichtige Darstellung zu erreichen, wird der Kanal B invers betrieben (Schalter +/- des Oszilloskops nicht gedrückt).

2. Aufgabe: Nehmen Sie folgende Abhängigkeiten der Spannung U_1 auf und stellen Sie diese in einem Diagramm geeignet dar.

Ausgangsspannung	U_1	= f (I_L)
Ausgangsbrummspannung	U_{1BRSS}	= f (I_L)

Sekundärspannung	U_{SEK}	= 12 V
Zweiweggleichrichtung:		
Laststrom	I_L	= 0 A; 0,5 A; 1 A
Ladekondensator	C_L	= 470 µF; 2200 µF

3. Aufgabe: Nehmen Sie folgende Abhängigkeit der Spannung U_2 bei RC- und LC-Siebung auf. Berechnen Sie die jeweiligen Siebfaktoren aus den gemessenen Spannungen. Erklären Sie die Stromabhängigkeit der Siebfaktoren für die LC-Siebung.

Ausgangsgleichspannung	U_2	= f (I_L)
Ausgangsbrummspannungen	U_{1BRSS}, U_{2BRSS}	= f (I_L)

Sekundärspannung	U_{SEK}	= 12 V
Zweiweggleichrichtung:		
Ladekondensator	C_L	= 47 µF
Siebkondensator	C_S	= 220 µF; 470 µF
Laststrom	I_L	= 0 A; 50 mA; 100 mA

4. Aufgabe: Nehmen sie folgende Abhängigkeit der Ausgangsbrummspannung des Transistorsiebgliedes auf und stellen Sie diese in einem Diagramm geeignet dar und berechnen Sie den Siebfaktor.

Ausgangsbrummspannungen	U_{1BRSS}, U_{3BRSS}	= f (I_L)

Sekundärspannung	U_{SEK}	= 12 V
Zweiweggleichrichtung:		
Ladekondensator	C_L	= 2000 µF
Laststrom	I_L	= 0 A; 0,5 A; 1 A

Wiederholen Sie die Messungen nach Umbau der Schaltung auf Stabilisierung mit Z-Diode. Nennen Sie Vor- und Nachteile beider Schaltungsvarianten.

3.2. Längsregler

5. Aufgabe: Ermitteln Sie den Stabilisierungsfaktor und den Ausgangswiderstand der diskreten Spannungsreglerschaltung bei verschiedenen Referenzen.

Ausgangsspannungen	U_A	= 9 V (SZX 21/5,1)
	U_A	= 4 V (B 589)

Für Messung des Stabilisierungsfaktors:

	U_E	= 12 V; 15 V
	$I_{E\ max}$	=< 2 A
	I_A	= 0,5 A
Referenzen:	Z-Diode SZX 21/5,1	
	Band-Gap B 589	

Für Messung des Ausgangswiderstandes:

	U_E	= 12 V
	U_A	= 9 V
	$I_{E\ max}$	=< 1,5 A
	I_A	= 0 A, 1 A
Referenz:	Z-Diode SZX 21/5,1	

6. Aufgabe: Um die Funktion von Strombegrenzung und Temperaturschutzschaltungen der integrierten Spannungsregler kennen zulernen, nehmen Sie folgende Funktion auf und stellen Sie diese grafisch dar.

Ausgangsspannung	U_A	= f (I_A)

Eingangsspannung	U_E	= 9 V
Eingangsstrom	$I_{E\ max}$	=< 2 A
Ausgangsspannung	U_A	= 5 V
Ausgangsstrom	I_A	= 0 A; 1 A; 1,5 A

Messen Sie danach den Ausgangsstrom I_K bei Kurzschluss am Ausgang. Lassen Sie den Kurzschlussstrom 1-2 Minuten fließen und verfolgen Sie, wie die Thermosicherung des Schaltkreises den Strom langsam zurückregelt. Messen Sie den Kurzschlussstrom der sich einstellt.

3.3. DC/DC-Wandler

7. Aufgabe: Ermitteln Sie folgende Abhängigkeiten für den Spannungsinverter ICL 7660 und stellen Sie diese in einem Diagramm dar.

Ausgangsspannung	U_A	= f (I_L)

Eingangsspannung	U_E	= 5 V
Laststrom	I_L	= 0 mA; 1 mA; 10 mA; 20 mA

Ausgangsspannung	U_A	= f (U_E)

Eingangsspannung	U_E	= 1,5 V; 2 V; 5 V
Laststrom	I_L	= 1 mA

8. Aufgabe: Ermitteln Sie die Abhängigkeit von Ausgangsspannung U_A und Eingangsstrom I_E vom Laststrom I_L für den DC / DC-Wandler MAX 642 an zwei Punkten der Kennlinie.

Eingangsspannung	U_E	= 5 V
Eingangsstrom	$I_{E\ max}$	<= 2 A
Laststrom	I_L	= 0 mA; 20 mA; 50 mA; 100 mA; 150 mA

Berechnen Sie den Wirkungsgrad bei einem Laststrom von 20, 100 und 150 mA.

3.4. Schaltnetzteil

9. Aufgabe: a) Nehmen Sie folgende Abhängigkeit auf:

Ausgangsspannung $U_A = f(I_L)$

Eingangsspannung	U_E	= 15 V
Eingangsstrom	$I_{E\,max}$	=< 2 A
Tastverhältnis	t_V	$= t_{EIN} / T = 0{,}1$
Laststrom	I_L	= 10 mA; 100 mA, 500 mA
Gleichrichterdiode:	SY 345	

Das Tastverhältnis ist mit dem linken Potentiometer einzustellen. Die Regelschaltung wird durch Drehen des rechten Potentiometers auf Linksanschlag außer Betrieb gesetzt.

b) Nehmen Sie weitere Messreihen bei geänderten Tastverhältnissen auf.

t_V = 0,2; 0,5

Stellen Sie das Ausgangskennlinienfeld geeignet dar.

Nehmen sie die Regelschaltung in Betrieb und ermitteln Sie folgende Abhängigkeit:

Ausgangsspannung $U_A = f(I_L)$

Laststrom I_L = 10 mA; 50 mA; 100 mA

Das linke Potentiometer ist auf Rechtsanschlag zu stellen.
Die Ausgangsspannung wird mit dem rechtem Potentiometer bei I_L = 10 mA auf 5 V eingestellt.
Tragen Sie die erhaltenen Werte in das Ausgangskennlinienfeld ein.

10. Aufgabe: Skizzieren Sie die Oszillogramme der Ansteuerspannung $u_{AN}(t)$, der Kollektorspannung $u_{CE}(t)$ und des Kollektorstromes $i_C(t)$ des Leistungstransistors auf Millimeterpapier. Wählen Sie eine Darstellung bei der der Zeitbezug aller drei Größen sichtbar wird.

Eingangsspannung	U_E	= 15 V
Eingangsstrom	$I_{E\,MAX}$	=< 2 A
Laststrom	I_L	= 100 mA

Das linke Potentiometer ist auf Rechtsanschlag zu stellen. Mit dem rechten Potentiometer ist eine Ausgangsspannung von 5 V einzustellen.

Da der Oszillograph nur 2 Eingangskanäle hat, werden zunächst $u_{AN}(t)$ und $u_{CE}(t)$ aufgenommen. Nach dem Umklemmen eines Einganges können dann $u_{AN}(t)$ und $i_C(t)$ gemeinsam oszillografiert werden. Die Aufnahme der von $i_C(t)$ erfolgt mit Hilfe der Stromzange, wobei zwischen Stromzange und Oszillograph der Abschlusswiderstand zu schalten ist (Stellung: 10 mA / mV) .

4. Literaturverzeichnis

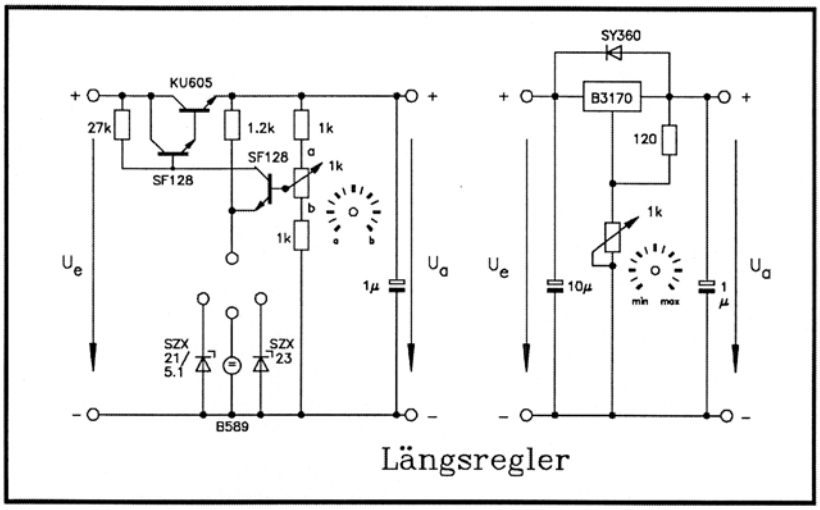
/1/ Seifart, M.: Analoge Schaltungen. 3.bearbeitete Aufl. Berlin: Verlag Technik 1989.

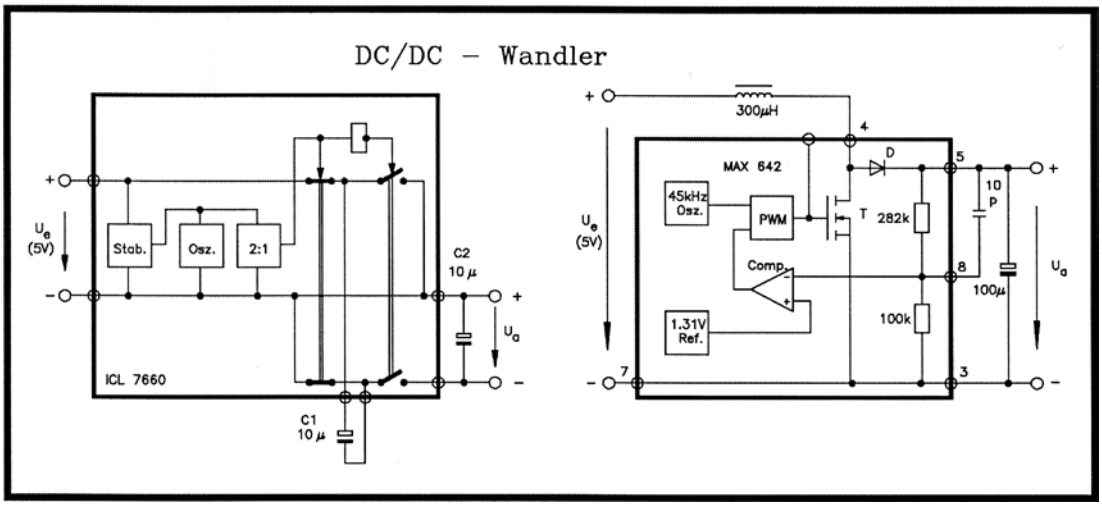
/2/ Tietze, U.; Schenk, Ch.: Halbleiter-Schaltungstechnik. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1990.

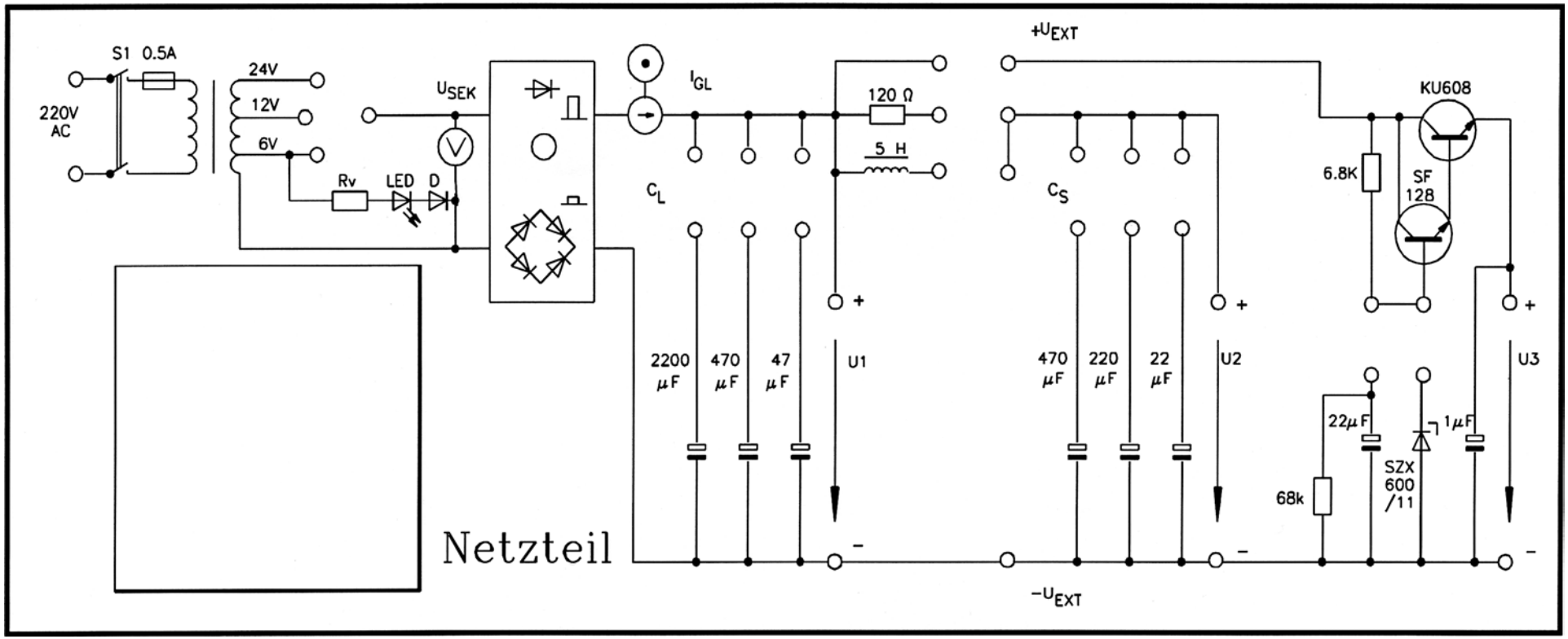
5. Erforderliche Geräte

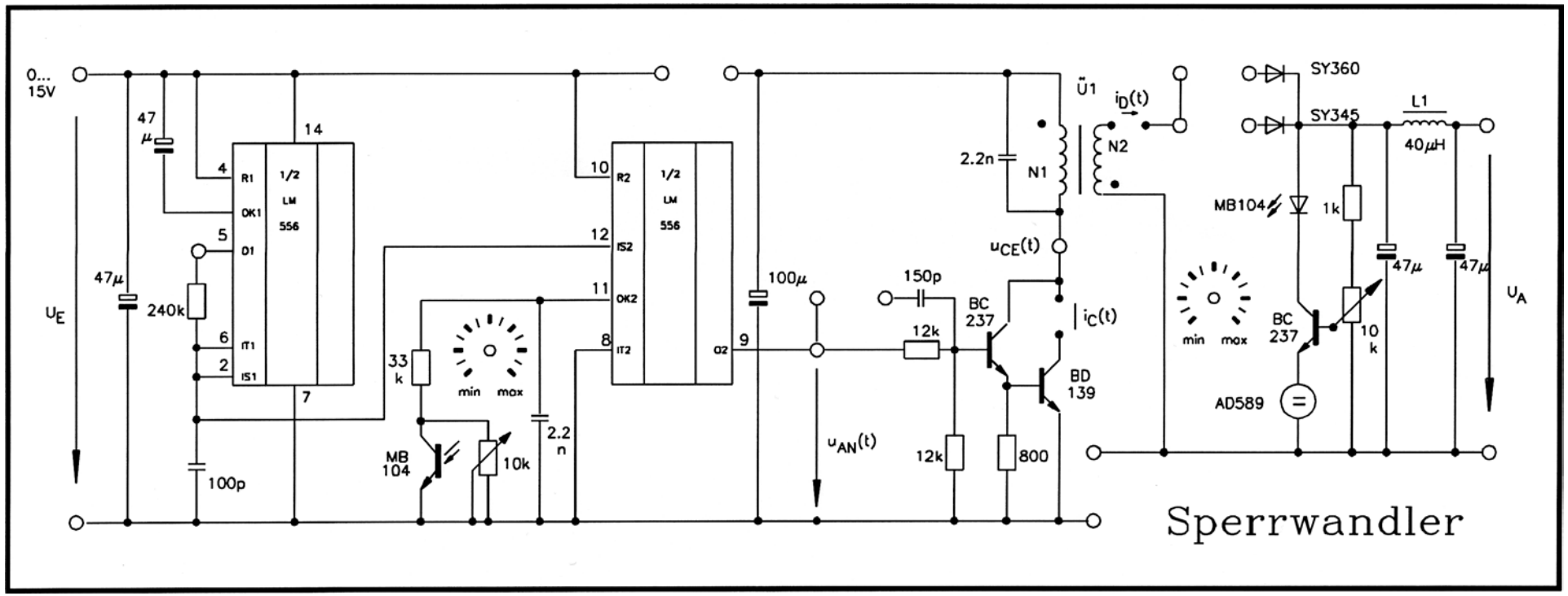
- Labormessleitungen
- Strom- und Spannungsmessgeräte
- Oszilloskop
- 4 Versuchsaufbauten
- Stromversorgungsgerät

6. Versuchsaufbauten






S1 0.5A
220V AC
24V
12V
6V
Rv
LED
D
USEK
IGL
CL
120 Ω
5 H
+UEXT
CS
KU608
6.8K
SF 128
2200 µF
470 µF
47 µF
U1
470 µF
220 µF
22 µF
U2
22µF
1µF
68k
SZX 600 /11
U3
-UEXT
Netzteil



Sperrwandler

7. Weitere Schwerpunkte

Welche Möglichkeiten der potentialfreien Messung von Gleich- und Wechselstrom gibt es?

Wie sieht das thermische Ersatzschaltbild eines Leistungstransistors auf einem Kühlkörper aus?

Wie verhält sich die Induktivität einer Spule mit Eisenkern, die von einem Gleichstrom durchflossen wird?