

Grundlagenpraktikum: Versuch 031

Elektronischer Hochsetzsteller und Hydraulischer Widder

Versuchsdurchführung: Pfaffenwaldring 47, ETI 1
Praktikumsraum 1.170
(„blaues“ Treppenhaus)

ACHTUNG: Bei diesem Versuch treten Spannungen **über 60 Volt** auf! Beachten Sie bitte die Sicherheitsvorschriften!

INHALT

1	Einleitung	3
2	Hydraulischer Widder (Stoßheber)	4
	2.1 Mechanische Grundlagen	4
	2.2 Versuchsbeschreibung	5
	2.2.1 Prinzip eines Stoßhebers	5
	2.2.2 Realisierter Stoßheber.....	6
	2.3 Versuchsdurchführung	8
	2.4 Zusammenfassung	11
3	Elektronischer Widder (Hochsetzsteller)	12
	3.1 Elektrische Grundlagen	12
	3.2 Versuchsdurchführung	14
	3.2.1 Prinzip des Hochsetzstellers	14
	3.2.2 Realisierter Hochsetzsteller.....	16
	3.3 Versuchsdurchführung	20
	3.4 Zusammenfassung	25
4	Analogiebetrachtung zwischen dem Hydraulischen und dem Elektronischen Widder (Hochsetzsteller)	26
5	Anhang	28
	5.1 Differenzastkopf und Strommesszange.....	28
	5.2 Herleitung der Formel für die Schaltfrequenz.....	28

1 Einleitung

Die Aufgabe der Leistungselektronik ist die Aufbereitung elektrischer Energie, welche einem speisenden System (Netz, Batterie, Generator) entnommen und einem bestimmten Verbraucher zugeführt wird.

Im folgenden Versuch wird als Beispiel für die Energieaufbereitung ein Hochsetzsteller vorgestellt.

Zum leichteren Verständnis des Prinzips wie auch der verwendeten Bauelemente (Spule, Transistor, Diode) wird zunächst ein mechanisches Analogon, der Hydraulische Widder, praktisch vorgestellt (Kap. 2).

Daran anschließend folgt der eigentliche Versuch mit dem Hochsetzsteller (Kap. 3), der hier auch als „Elektronischer Widder“ bezeichnet wird.

In Kapitel 4 soll abschließend eine Analogiebetrachtung zwischen beiden Widdern durchgeführt werden.

Im letzten Kapitel sind ein paar Hinweise zur Messtechnik gegeben.

2 Hydraulischer Widder (Stoßheber)

2.1 Mechanische Grundlagen

Setzt man das Wasser als inkompressibel voraus und vernachlässigt man jegliche Reibung, so gelten folgende Definitionen und Grundgesetze der Hydromechanik:

- Potenzielle Energie: $E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h = \gamma \cdot V \cdot h$
- Kinetische Energie: $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$
- Kontinuitätsgleichung: $v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2$
- Wirkungsgrad (hier): $\eta = \frac{E_{\text{pot}2}}{E_{\text{pot}1}} = \frac{Q_2 \cdot h_2}{Q_1 \cdot h_1 + Q_2 \cdot h_1}$

Bedeutung der Abkürzungen:

m =	Masse des (gehobenen) Wassers	[kg]
V =	Volumen (welches die Masse m einnimmt)	[m ³]
h =	Höhe	[m]
γ =	Spezifisches Gewicht des Wassers	[10 ⁴ N/m ³]
v =	Durchflussgeschwindigkeit	[m/s]
A =	Rohrquerschnittsfläche	[m ²]
Q =	Wassermenge (Gewicht) Q = m · g	[kg · m/s ²]

2.2 Versuchsbeschreibung

Der Hydraulische Widder ist eine Wasserhebemaschine, die einen Teil des mit einem gewissen Gefälle ständig zufließenden Wassers auf größere Höhen heben kann.

2.2.1 Prinzip eines Stoßhebers

Das Triebwasser fließt in der Triebleitung T_L dem Widder zu und strömt zunächst am geöffneten Schieber S_R vorbei ins Freie (Bild 1).

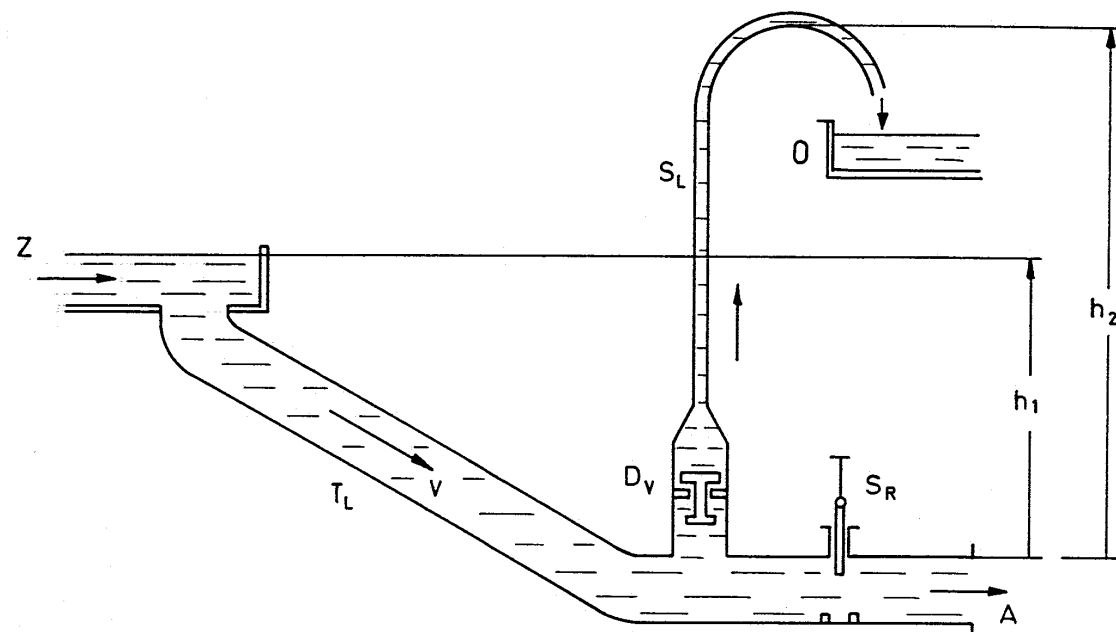


Bild 1: Schema eines Hydraulischen Widders
Z Zufluss, A Abfluss, T_L Triebleitung, S_L Steigleitung,
 D_V Druckventil, S_R Schieber, O Oberbehälter

Beim Erreichen einer hinreichenden Ausflussgeschwindigkeit wird der Schieber rasch geschlossen. Die kinetische Energie der Wassersäule in der Triebleitung wird dann in Druckenergie umgesetzt, wodurch das Wasser über das sich öffnende Druckventil D_V in die Steigleitung S_L gestoßen wird.

Würde man eine Widderanlage gemäß Bild 1 realisieren, so hätte diese folgende Mängel:

- a) Manuelle Schieberbedienung
- b) Stoßweiser Ausfluss in den Oberbehälter

2.2.2 Realisierter Stoßheber

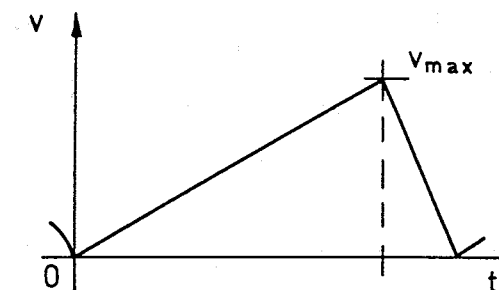
Bild 2 zeigt eine Skizze der aufgebauten Versuchsanlage. Der Schieber aus Bild 1 wurde durch ein Spezialstoßventil S_V ersetzt und in die Steigleitung wurde ein Windkessel eingefügt. Außerdem wurden noch ein Trieb- und ein Steigleitungshahn notwendig.

Arbeitsweise der aufgebauten Widderanlage

Dieser Versuchswidder ist eine selbstständige Wasserhebeanlage. Nimmt man zunächst an, der Widder sei bereits in Betrieb und das Stoßventil sei geöffnet, so kann man die Funktionsweise in zwei Phasen aufteilen:

1. Phase: Zwischenspeicherung von kinetischer Energie in der Triebleitung

Bei geöffnetem Stoßventil kann das Triebwasser ungehindert abfließen. Dabei wird die Durchflussgeschwindigkeit v der Triebwassersäule ungefähr



linear zunehmen (vgl. nebenstehende Skizze). Nach Erreichen einer vorbestimmten Geschwindigkeit v_{max} sperrt das Stoßventil, ausgelöst durch den Strömungsdruck, mit hörbarem Schlag den Wasseraustritt plötzlich ab.

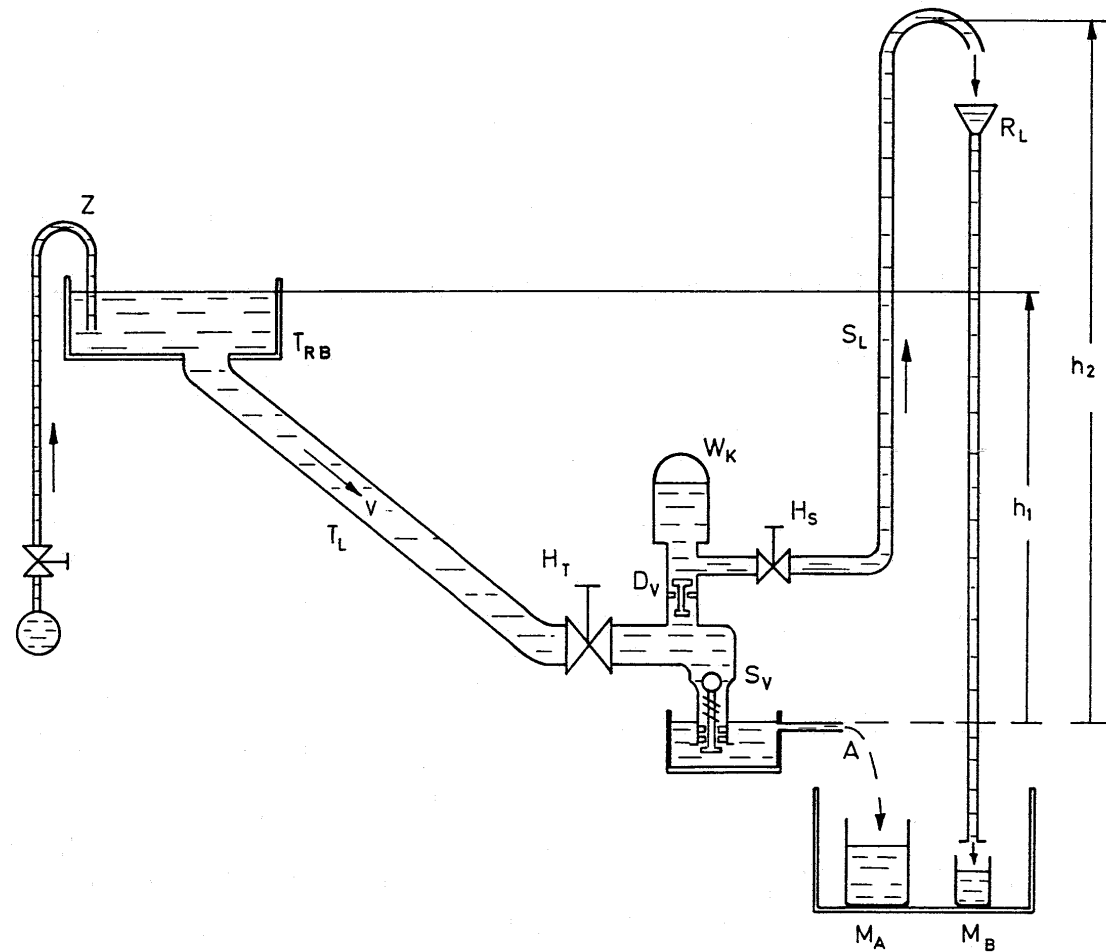


Bild 2: Realisierter Hydraulischer Widder
 Z Zufluss, T_{RB} Triebwasserbecken, T_L Triebleitung,
 S_L Steigleitung, R_L Rückleitung, W_K Windkessel,
 D_V Druckventil, H_T Triebleitungshahn, S_V Stoßventil,
 A Ausfluss, M_A Messbecher A, M_B Messbecher B.

2. Phase: Energieabgabe

Wie bereits unter Kapitel 2.2.1 geschildert, öffnet sich nun durch die **stetige** Bewegungsenergie der nachschiebenden Wassersäule das Druckventil D_V und fördert eine entsprechende Wassermenge in den Windkessel W_K und von dort aus in die Steigleitung. Der Windkessel dämpft hier lediglich die Druckstöße.

Nach dem Abklingen der Bewegungsenergie ($v = 0$) schließt das Druckventil und es erfolgt eine geringe elastische Rückschwingung der Wassersäule in der Triebleitung, welche das selbstständige Wiederöffnen des Stoßventils bewirkt und die erste Phase von Neuem beginnen lässt.

2.3 Versuchsdurchführung

Aufgabe 1

Nehmen Sie die Widderanlage nach folgenden 4 Schritten in Betrieb und bestimmen Sie den Wirkungsgrad.

(Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die Widderanlage bereits entlüftet wurde. Trieb- und Steigleitungshähne sind geschlossen.)

1. Öffnen Sie den Triebwasserhahn.
2. Drücken Sie den roten Anwurfstift für das Stoßventil kurz nach oben. Der Widder führt den ersten Stoß aus.
3. Punkt 2 eventuell wiederholen, bis der Widder selbstständig läuft.
4. Den linken Steigleitungshahn langsam öffnen, so dass der Widder nicht stehen bleibt.

Zur Berechnung des Wirkungsgrades:

In der vorhandenen Anlage sind zwei Steigleitungen mit unterschiedlicher Steighöhe installiert.

Üblicherweise erreichen hydraulische Widder mit zunehmendem Verhältnis von Steighöhe zu Fallhöhe einen höheren Wirkungsgrad. Dieser soll hier für die Steighöhe h_{2b} ermittelt werden.

Hinweis: Zum Umschalten der Steigleitungen sind zunächst beide Steigleitungshähne zu schließen!

Daten der Widderanlage:

Fallhöhe:	h_1	=	161 cm
Steighöhe: (linker Hahn)	h_{2a}	=	344 cm
(rechter Hahn)	h_{2b}	=	1095 cm

Die zur Berechnung notwendigen Wassermengen Q_1 und Q_{2b} gewinnen Sie mithilfe der beiden Messbecher.

Wirkungsgradbestimmung:

.....

.....

.....

.....

Aufgabe 2

Beurteilen Sie folgende beide Aussagen bzgl. des Energiesatzes:

- a) Der Energiesatz kann hier nicht angewendet werden, weil ohne Fremdenergie kein Wasser „bergauf“ befördert werden kann.
- b) Der Energiesatz hat Gültigkeit, da lediglich eine große Wassermenge mit kleiner Geschwindigkeit (Tribleitung) in Energie einer kleinen Wassermasse mit großer Geschwindigkeit umgesetzt wird. Fremdenergie ist nicht notwendig.

.....

.....

.....

Aufgabe 3

Erhöht sich die Wirkung des Widders, wenn man die Federkraft der Stoßventil-Spannfeder erhöht?

.....

.....

.....

2.4 Zusammenfassung

Der Hydraulische Widder ist eine in Aufbau und Wartung einfache, anspruchslose Wasserhebemaschine. Der Wirkungsgrad liegt je nach Gefälle und Steighöhe bei kommerziellen Widdern zwischen 50 % und 80 %.

Der Widder findet heute vornehmlich im Gebirge Anwendung, um höher gelegene Felder zu bewässern. Gerade im Gebirge sind die beiden wichtigen Voraussetzungen erfüllt:

- Reichliche, billige, sich stets ergänzende Wassermengen (Quellen).
- Die vom Widder nicht gebrauchte Wassermenge kann vom Widderstandort frei abfließen.

3 Elektronischer Widder (Hochsetzsteller)

3.1 Elektrische Grundlagen

- Zeitlicher Verlauf von Strom und Spannung an einer **Spule** (Induktivität, Drossel)

$$u(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad \begin{array}{c} u(t) \\ \longrightarrow \\ \text{---} \\ \longleftarrow \\ i(t) \end{array} \quad (1)$$

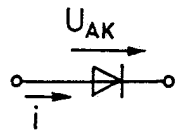
- Augenblickswert der Leistung in einer **Spule**:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \stackrel{(1)}{=} L \cdot \frac{di(t)}{dt} \cdot i(t) \quad (2)$$

- Energieinhalt einer **Spule**:

$$E(t) = \int_0^t p(t^*) dt^* \stackrel{(2)}{=} \frac{1}{2} \cdot L \cdot i(t)^2 \quad (3)$$

- Eine **Diode** kann nur in einer Richtung Strom führen; die Spannung U_{AK} ist in diesem Falle ungefähr Null. Falls die Diode sperrt, fließt kein Strom ($i = 0$). Die Spannung U_{AK} wird dann negativ und als Sperrspannung bezeichnet.



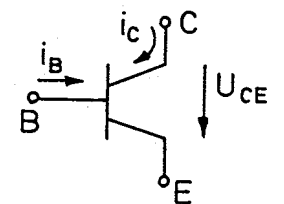
- Der einzige **Transistor** dieses Versuchs kann als Schalter aufgefasst werden:

- Der Transistor leitet, solange ein positiver Basisstrom i_B ausreichender Größe fließt.

Dann gilt: $U_{CE} = 0$;

- Der Transistor sperrt, wenn der Basisstrom i_B Null wird.

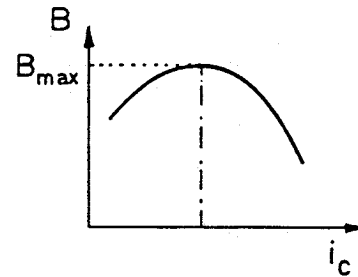
Dann gilt: $i_C = 0$.



- Als Großsignal-Stromverstärkung B bezeichnet man bei einem Transistor das Verhältnis von Kollektor- zu Basisstrom:

$$B = \frac{i_C}{i_B} \quad (4)$$

Diese Stromverstärkung ist nicht konstant, sondern hängt u. a. vom Kollektorstrom i_C ab:



- Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 \cdot I_2}{U_1 \cdot I_1} \quad (5)$$

Bedeutung der Abkürzungen:

$u(t)$ = zeitlich veränderliche Spannung	[V]				
V = Volumen (welches die Masse m einnimmt)	[m ³]				
$i(t)$ = zeitlich veränderlicher Strom	[A]				
I = Gleichstrom (arithmetischer Mittelwert)	[A]				
U = Gleichspannung (arithmetischer Mittelwert)	[V]				
P = Leistung	[W]				
L = Induktivität einer Spule	[H = $\frac{Vs}{A}$]				
<table border="0"> <tr> <td>B = Basis-</td> <td rowspan="3">} Anschluss eines Transistors</td> </tr> <tr> <td>C = Kollektor-</td> </tr> <tr> <td>E = Emitter-</td> </tr> </table>	B = Basis-	} Anschluss eines Transistors	C = Kollektor-	E = Emitter-	
B = Basis-	} Anschluss eines Transistors				
C = Kollektor-					
E = Emitter-					

3.2 Versuchsdurchführung

Ein Hochsetzsteller kann eine angebotene Gleichspannung U_1 in eine Ausgangsspannung U_2 „hochsetzen“, wobei $U_2 > U_1$ ist. Hierbei wird elektrische Energie überführt.

Im Versuch soll eine handelsübliche Leuchtstofflampe (110 V – 230 V) an einer 24 V Gleichspannung (Netzgerät, Batterie) betrieben werden.

3.2.1 Prinzip des Hochsetzstellers

Zur Erläuterung des Funktionsprinzips genügen drei Bauelemente: eine Spule L , eine Diode D und ein Schalter S (Bild 3)

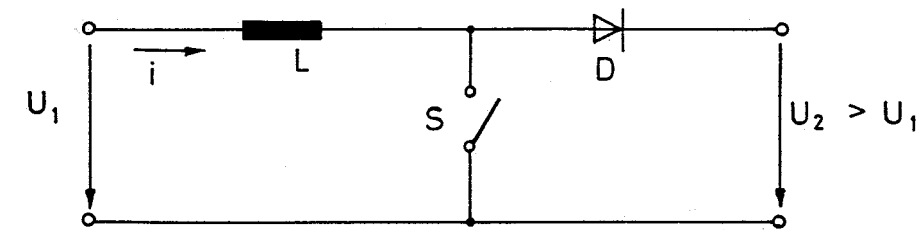


Bild 3: Prinzipschaltbild eines Hochsetzstellers

Im Folgenden steht eingangsseitig eine Batterie U_1 und ausgangssseitig eine Batterie U_2 zur Verfügung ($U_2 > U_1$).

Schließt man den Schalter S , so kann durch die Spule L ein stetig ansteigender Strom fließen, wobei die Spule als elektrischer Energiespeicher fungiert. Öffnet man nach einer gewissen Zeit den Schalter S wieder, so wird zwar der Strompfad unterbrochen, jedoch kann der Strom aus physikalischen Gründen nicht springen (Stetigkeit der Energie!).

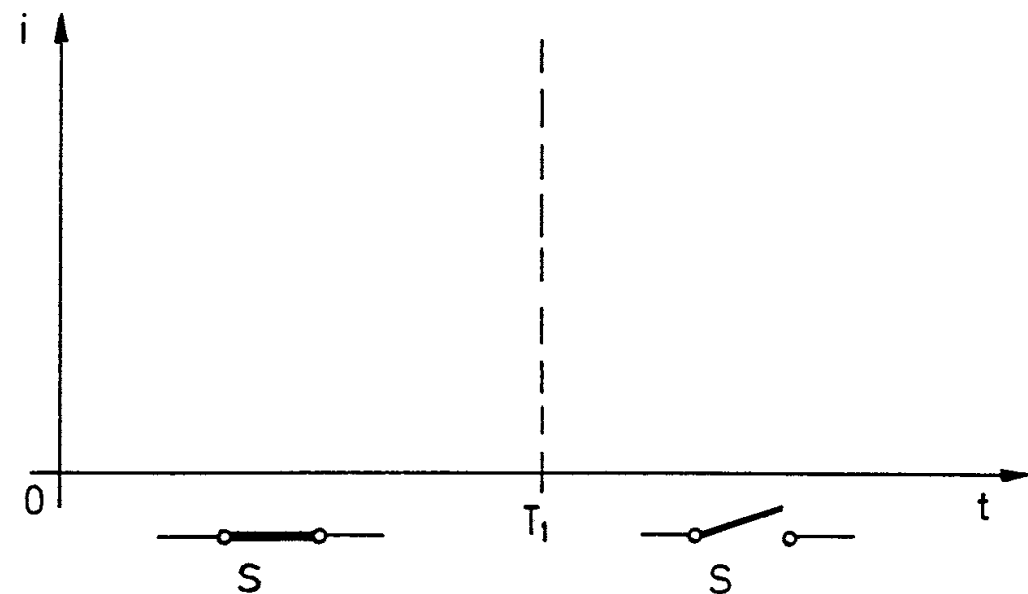
Die in der Spule zwischengespeicherte Energie treibt also den Strom durch die Diode D (Durchlassrichtung) weiter.

Da der Strom nun gegen die höhere Spannung U_2 anlaufen muss, wird der Strom abnehmen und schließlich Null werden.

Aufgabe 4

Wie sieht qualitativ der Stromverlauf $i(t)$ aus, wenn man den Schalter S zum Zeitpunkt $t = 0$ schließt und ihn nach der Zeit T_1 wieder öffnet?

Hinweis: Setzen Sie in Gleichung (1) $u(t) = U_1$ und leiten Sie daraus $i(t)$ ab. Den ermittelten Stromverlauf tragen Sie in untenstehende Skizze ein:



Aufgabe 5

Aus den Überlegungen zu Aufgabe 4 kann man folgern, dass sich ein maximaler Strom i_{\max} durch die Spule ergibt. Wie bestimmt sich i_{\max} aus U_1 , L und T_1 ?

.....

.....

Ein Hochsetzsteller – bestehend aus den drei Bauelementen D, L und S (Bild 3) – hätte folgende Mängel:

- a) Manuelle Schalterbetätigung
- b) Pulsierende Ausgangsspannung U_2

Diese Mängel werden durch die realisierte Schaltung (Kap. 3.2.2) vermieden.

3.2.2 Realisierter Hochsetzsteller

Bild 4 zeigt den Schaltplan für den aufgebauten Versuchs-Hochsetzsteller. Anstelle des mechanischen Schalters S wurde ein Transistor T eingesetzt, verbunden mit einer Basisansteuerung.

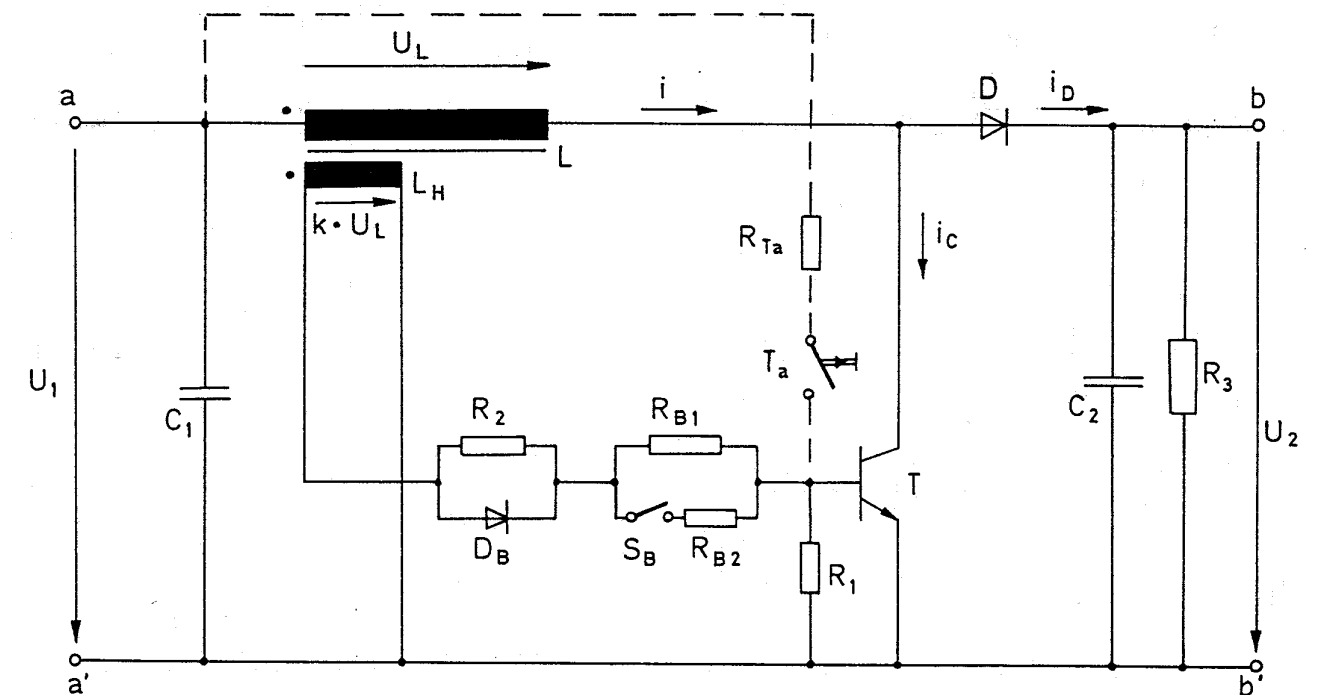


Bild 4: Schaltplan des Versuchs-Hochsetzstellers
 T = Transistor, D = Diode, L = Spule, L_H = Hilfswicklung,
 T_a = Taster (Starten),
 U_1 = Eingangsspannung, U_2 = Ausgangsspannung.

Der Ein- und Ausgangsspannung wurden die Kondensatoren C_1 bzw. C_2 parallel geschaltet, um die Spannungen zu puffern bzw. zu glätten. Der Widerstand R_3 am Ausgang bewirkt die Entladung des Kondensators C_2 beim Ausschalten, aber auch eine Begrenzung der Ausgangsspannung.

Der Taster T_a mit dem Vorwiderstand R_{Ta} dient ausschließlich dem Start des Hochsetzstellers.

Anmerkung zur Basisansteuerung des Transistors:

Die eingebauten Widerstände R_1 und R_2 , sowie die Diode D_B sind notwendig, um die Sperrspannung des Transistors zwischen Basis und Emitter auf ca. -10 V zu begrenzen. Die Diode D_B überbrückt dabei im leitenden Zustand des Transistors den Widerstand R_2 , so dass der Basisstrom praktisch nur durch die Widerstände R_{B1} bzw. $R_{B1} \parallel R_{B2}$ bestimmt wird.

Arbeitsweise des Versuchs-Hochsetzstellers:

Durch Drücken der Starttaste T_a erhält die Basis des Transistors T einen positiven Impuls, d. h. der Transistor schaltet durch ($U_{CE} = 0$). Nach diesem erstmaligen Einschalten des Transistors spielt sich folgender, periodischer Vorgang ab:

1. Phase: Energiezwischenspeicherung

Bei leitendem Transistor gilt zunächst $i_C = i$. An der Hauptwicklung L der Spule liegt die Eingangs-Batteriespannung $U_L = U_1 = 24\text{ V}$ und der Spulenstrom i steigt gemäß $U_1 = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$ zeitlinear an. (Vgl. Aufgabe 4).

Durch eine induktive Kopplung liegt dann an der Hilfswicklung L_H der Spule ein bestimmter, über die Windungszahlen festgelegter Teil $k \cdot U_L = k \cdot U_1$ der Eingangsspannung.

Diese Spannung verursacht einen positiven Basisstrom i_B und hält damit den Transistor im leitenden Zustand.

Der Basisstrom wird über den Basiswiderstand R_{B1} (Schalterstellung: 1) auf einen Wert von ca. 70 mA begrenzt. Entsprechend der Stromverstärkung B des verwendeten Transistors, wobei $B = 100$ ist, fließt ein maximaler Kollektorstrom

$$i_C^{(4)} = B \cdot i_B = 7\text{ A}$$

Steigt aber durch den äußeren Stromkreis der Kollektorstrom weiter an, kann der Basisstrom nicht mehr ausreichen, um den Transistor voll durchzusteuern. Ein immer größer werdender Spannungsabfall U_{CE} am Transistor ist die Folge.

Wenn sich aber zwischen Kollektor und Emitter eine Spannung aufbaut, wird – vergl. Bild 4 – über den nun geringeren Spannungsabfall an der Hauptwicklung L die Hilfsspannung $k \cdot U_L$ abgebaut. Dies verursacht einen kleineren Basisstrom i_B , die Kollektor-Emitter-Spannung wird noch mehr erhöht, der Basisstrom dadurch weiter vermindert, usw.

Es ergibt sich also ein sehr rascher Mitkoppelvorgang, der den Transistor vom leitenden in den sperrenden Zustand überführt.

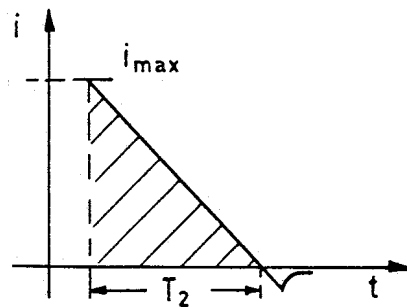
Nun soll aber dieser „Elektronische Widder“ selbstständig arbeiten, d. h. die in der Hauptwicklung zwischengespeicherte Energie

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i_{\max}^2$$

muss dem Verbraucher zugeführt und der Transistor anschließend wieder in den leitenden Zustand gebracht werden.

2. Phase: Energieabgabe

Schon in Kapitel 3.2.1 wurde gezeigt, dass unmittelbar nach dem Sperren des Transistors (= Schalter) der Spulenstrom i weiter fließen **muss**. Wie beschrieben, bleibt dem Strom nichts anderes übrig, als über die Diode D gegen die Spannung $U_2 > U_1$ anzulaufen. Der Strom nimmt dabei linear ab und wird bei genauerer Betrachtung sogar kleiner (!) als Null.



Wie nebenstehende Skizze zeigt, wird während der Zeit T_2 die Ladungsmenge:

$$q = \frac{1}{2} \cdot i_{\max} \cdot T_2$$

in den Verbraucher eingespeist.

Dass der Spulenstrom i kurzzeitig kleiner als Null wird, ist hier kein störender Nebeneffekt, sondern für das erneute Einschalten des Transistors unbedingt notwendig.

Dieser sog. „Trägerstauereffekt“ rührt daher, dass die in der Sperrschicht der Siliziumdiode D vorhandenen Ladungsträger zunächst ausgeräumt werden müssen (= Rückstrom in Sperrrichtung der Diode), bis die Diode voll sperren kann.

Das Abreißen dieses Rückstroms bedingt aber an der Hauptwicklung L einen positiven Spannungsimpuls, wodurch über die Hilfswicklung L_H ein positiver Basisstrom erzeugt wird. Dieser Basisstrom bringt über einen erneuten Mitkoppelvorgang den Transistor schnell wieder in den leitenden Zustand und es kann wieder Phase 1 beginnen.

3.3 Versuchsdurchführung

Aufgabe 6

Nehmen Sie den Hochsetzsteller nach folgenden 4 Schritten in Betrieb:

- 1) Gemäß dem Schaltplan, Bild 4, sind die einzelnen Bauelemente auf dem Versuchsbrett zu verbinden.
 - Die strichliert dargestellte Leitung in Bild 4 zur Starttaste T_a ist bereits verdrahtet.
- 2) Schließen Sie an den Ausgang (b-b') die Leuchtstofflampe an; dazu parallel das Voltmeter.
 - Voltmeter-Einstellung: 600 V Gleichspannung.
- 3) Der Eingang (a-a') wird mit der 24 V Batteriespannung verbunden.
 - Das Voltmeter muss 24 V anzeigen.
- 4) Umschalter für die Basiswiderstände auf Stellung 1.
Zum erstmaligen Einschalten des Transistors (= Durchschalten) kurzzeitig die grüne Starttaste T_a drücken.
 - Man hört sofort eine Schwingung (ca. 4 kHz) und das Voltmeter zeigt ca. 300 V an. Nach dem Aufleuchten der Leuchtstofflampe muss die Ausgangsspannung auf ca. 110 V zurückgehen.

Hinweis: Der Hochsetzsteller wird durch Abklemmen der 24 V Batteriespannung ausgeschaltet!

Aufgabe 7

Oszillografieren Sie folgende Ströme und Spannungen und tragen Sie deren zeitliche Verläufe in die Skizzen auf Seite 22 ein.

i Spulenstrom
 i_C Kollektorstrom
 i_D Diodenstrom

} mit Strommesszange gemessen

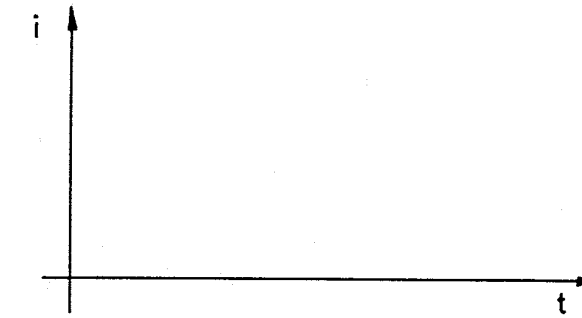
U_{CE} Kollektor-Emitter-Spannung
 U_L Spannung zwischen den Anschlüssen der Hauptwicklung

} über Differenzastkopf gemessen

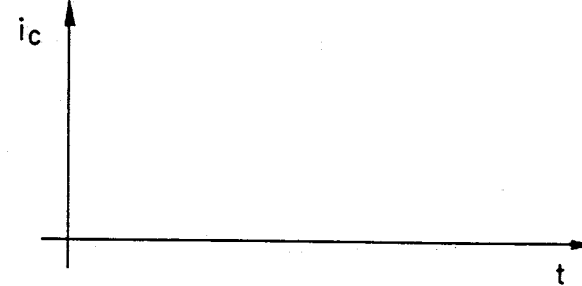
Bezüglich der Messanordnung von Strommesszange und Oszilloskop (vgl. Kap. 5).

Denken Sie an eine Bezifferung der Koordinaten!

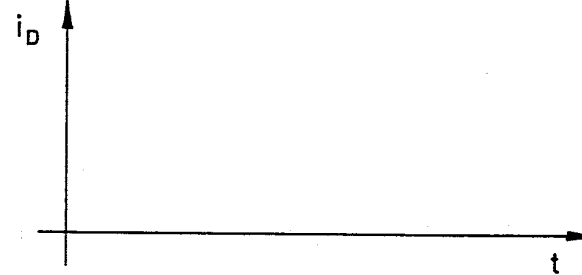
Spulenstrom



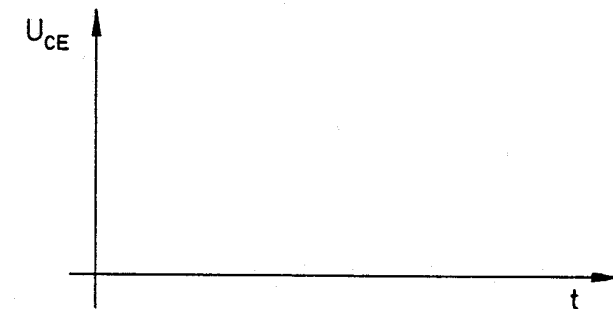
Kollektorstrom



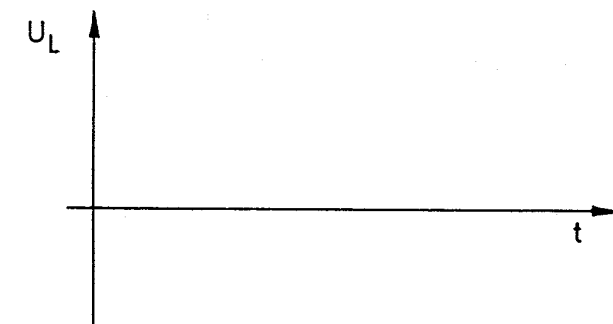
Diodenstrom



Kollektor-Emitterspannung



Spannung an der Hauptwicklung L der Spule



Aufgabe 8

Berechnen Sie den Wirkungsgrad dieses Hochsetzstellers

- Hierzu müssen Sie Eingangsstrom und -spannung sowie Ausgangsstrom und -spannung messen.
- η ergibt sich nach Gleichung (5).

.....
.....

Können Sie ein paar Gründe aufzählen, warum sich hier nicht $\eta = 100\%$ ergibt?

.....
.....
.....
.....

Aufgabe 9

Für die Schaltfrequenz des Hochsetzstellers lässt sich folgende Formel gewinnen (vgl. Sie Kap. 5.2)

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1 - \frac{U_1}{U_2}}{T_1}$$

Dabei ist T_1 die Zeit innerhalb einer Periode, während welcher der Transistor leitet.

Bringen Sie den Umschalter für die Basiswiderstände auf Stellung 2. Sie nehmen deutlich eine Frequenzverminderung wahr und die Leuchtstofflampe brennt etwas heller.

In Stellung 1 des Umschalters beträgt der Basiswiderstand $R_B = R_{B1} = 2,2 \Omega$,
in Stellung 2 ergibt sich $R_B = R_{B1} \parallel R_{B2} = 2,2 \Omega \parallel 4,7 \Omega = 1,5 \Omega$.

Können Sie diesen Vorgang begründen?

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Aufgabe 10

Beurteilen Sie folgende beide Aussagen bezüglich des Energiesatzes. (Betrachten Sie hierzu den **idealen Hochsetzsteller** nach Bild 3).

- A) Eine Anwendung des Energiesatzes in dem Sinne, dass die eingangs angelieferte Energie gleich der Ausgangsenergie sein muss, ist hier unmöglich, weil der größte Teil der Spulenenergie zum Eingang zurückfließen wird.
- B) Der Energiesatz gilt, weil die ganze in der Spule zwischengespeicherte Energie (kleine Spannung und großer Strom) an den Verbraucher abgegeben wird (dort große Spannung und kleiner Strom).

3.4 Zusammenfassung

Der hier vorgeführte Hochsetzsteller (engl. boost-converter bzw. step-up-converter) ist ein einfacher Gleichstromsteller, der die angebotene elektrische Energie von dem Gleichstromsystem U_1 in ein anderes Gleichstromsystem mit höherer Spannung U_2 umsetzt.

Sein entscheidendes Funktionsprinzip besteht in der kurzzeitigen Zwischenspeicherung der Eingangsenergie, um sie danach an den Verbraucher abzugeben.

Der hier behandelte Hochsetzsteller könnte z. B. bei einer Notlichtversorgung angewendet werden. Dort müssen die Leuchtstofflampen bei Netzausfall weiterbrennen, was nach dem vorgeführten Beispiel über eine Autobatterie möglich ist.

4 Analogiebetrachtung zwischen dem Hydraulischen und dem Elektronischen Widder (Hochsetzsteller)

Aus den Kapiteln 2 und 3 geht hervor, dass direkte Analogien zwischen beiden Widdern möglich sind.

Versuchen Sie, sich anhand der untenstehenden Gegenüberstellung die jeweilige Analogie zu verdeutlichen:

Hydraulischer Widder Bild 2	Elektronischer Widder Bild 4
A) Bauteile	
Triebwasserbecken T_{RB} Windkessel W_K Stoßventil S_V Druckventil D_V Triebleitung T_L	Batterie, Kondensator C_1 Kondensator C_2 Transistor T Diode D Spule L
B) Physikalische Größen	
Fallhöhe · Erdbeschl. $(g \cdot h_1) \left[\frac{Nm}{kg} \right]$ (= Potenzielle Energie pro Masseneinheit)	Eingangsspannung $U_1 \left[V = \frac{Nm}{C} \right]$ (= Potenzielle Energie pro Ladungseinheit)
Steighöhe · Erdbeschl. $(g \cdot h_2) \left[\frac{Nm}{kg} \right]$ (= Potenzielle Energie pro Masseneinheit)	Ausgangsspannung U_2
Wassermasse m [kg]	Ladung Q [C]
Triebwasserdurchfluss $d = \frac{dm}{dt} \left[\frac{kg}{s} \right]$	Ladungsdurchfluss $i = \frac{dQ}{dt} \left[\frac{C}{s} \right]$

C) Vorgänge

Füllen der Tribleitung.	Einspeisung von elektr. Energie in die Spule ($E = \frac{1}{2}L \cdot i(t)^2$).
Ausreichende, konstante Triebwassermenge.	Konstante, starre Speisepannung (Batterie).
Öffnen des Stoßventils, ausgelöst durch das elastische Rückschwingen der Triebwassersäule.	Zünden des Transistors, ausgelöst durch den Diodenrückstrom („Trägerstauereffekt“).
Das Stoßventil wird durch aufschaukelnde Zug- und Stoßkräfte geschlossen (Mitkopplung).	Der Transistor wird durch Kollektorstrombegrenzung und Einsetzen einer Kollektor-Emitter-Spannung gesperrt (Mitkopplung).
Der Energiezuwachs der kleinen, aufsteigenden Wassermasse wird durch Energieverlust der großen, zur Ruhe kommenden Wassermasse gedeckt.	Der Energiezuwachs der geringen Ladung, die gegen die Ausgangsspannung U_2 bewegt wird, stammt vom Energieverlust der anfangs zugeführten Ladung.
Eine Erhöhung der Federspannung des Stoßventils erhöht den Wasserdurchsatz durch den Widder.	Eine Erhöhung des Kollektorstroms (mittels R_B) erhöht den Ladungsdurchsatz durch den Hochsetzsteller.

5 Anhang

5.1 Differenzastkopf und Strommesszange

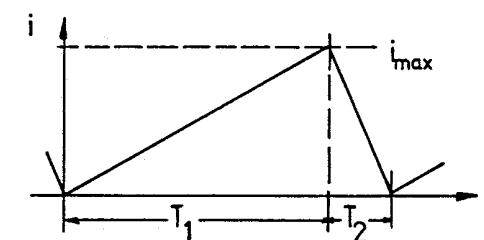
Im Rahmen der Versuchsdurchführung (Kap. 3.3) müssen die zeitlichen Verläufe von Strömen und Spannungen oszillografierte werden.

Spannungen (gemessen zwischen zwei Punkten) werden dabei mit einem Differenzastkopf dem Oszilloskop zugeführt.

Zur Messung von Strömen werden Strommesszangen eingesetzt.

5.2 Herleitung der Formel für die Schaltfrequenz

Aus den Oszillogrammen (Aufgabe 4) gewinnt man folgenden zeitlichen Verlauf des Spulenstroms.



Als Lösung zur Aufgabe 5 gewinnt man folgenden Zusammenhang:

$$i_{\max} = \frac{U_1}{L} \cdot T_1 \quad (\text{A})$$

Um die Zeit T_2 zu bestimmen, stellt man eine zweite Differentialgleichung für die Sperrphase des Transistors T auf:

$$U_1 - U_2 = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (\text{B})$$

Hieraus folgt als Lösung:

$$i = i_{\max} - \frac{U_2 - U_1}{L} \cdot (t - T_1) \quad (\text{C})$$

Aus (C) lässt sich nun ebenfalls i_{\max} bestimmen, denn für $t = T_1 + T_2$ ist $i = 0$ (siehe Skizze), also gilt:

$$i(t = T_1 + T_2) = 0 = i_{\max} - \frac{U_2 - U_1}{L} \cdot T_2 \quad (\text{D})$$

Setzt man nun (A) in (D) ein, ergibt sich

$$\frac{U_1}{L} \cdot T_1 = \frac{U_2 - U_1}{L} \cdot T_2 \quad (\text{E})$$

oder

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{U_1}{U_2 - U_1} = \frac{1}{\frac{U_2}{U_1} - 1} \quad (\text{F})$$

Schließlich folgt für die Periodendauer T:

$$T = T_1 + T_2 = T_1 \cdot \left(1 + \frac{T_2}{T_1}\right) \quad (\text{G})$$

(F) in (G) eingesetzt ergibt:

$$T = T_1 \cdot \left(1 + \frac{1}{\frac{U_2}{U_1} - 1}\right) = \frac{T_1 \cdot \frac{U_2}{U_1}}{\frac{U_2}{U_1} - 1} \quad (\text{H})$$

und schließlich aus (H):

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1 - \frac{U_1}{U_2}}{T_1} \quad \text{q. e. d.}$$