

Elektronische Spannungs- und Stromreglerschaltungen

Prinzipien und Schaltungsbeispiele

Eine Hausarbeit von [Mitja Stachowiak](#),
im Fach Technologie,
[Heinrich Emanuel Merck Schule Darmstadt](#),
März 2011

Überblick:

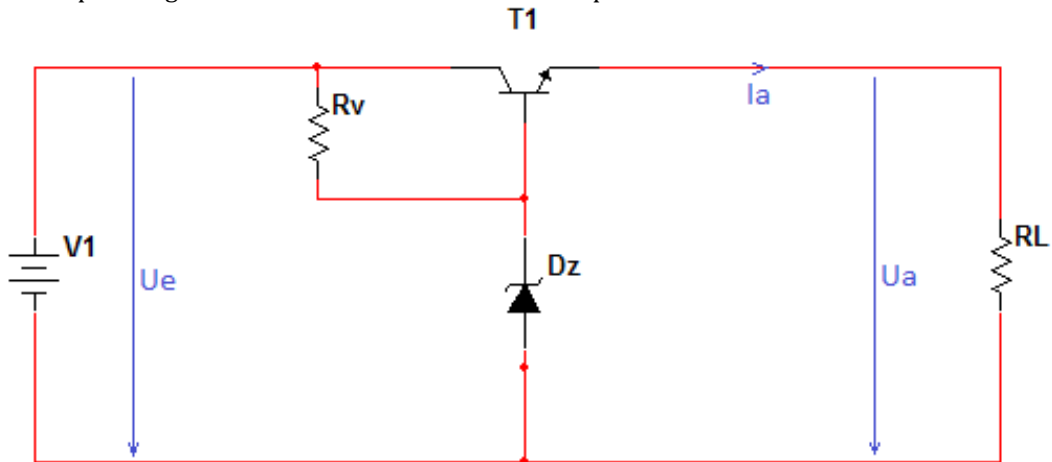
Dieses Referat erklärt die Funktionsweise von Spannungs- und Stromreglern, ausgehend von einer einfachen Grundstruktur bis hin zu einstellbaren Größen und Glättungskondensatoren. Alle Vorlagen für Schaltungen entstammen dem Unterrichtsmaterial; dazu mehr in den Literaturnachweisen. Alle Messungen wurden mit NI Multisim 10.1 durchgeführt. Es folgt eine Übersicht des Aufbaus:

1 Spannungsregler	2
1.1 Prinzip des Spannungsreglers.....	2
1.1.1 Messwerte 1.....	3
1.2 Doppelte Transistoren.....	5
1.3 Separater Regeltransistor 1.....	5
1.4 Glättungskondensator.....	6
1.4.1 Messwerte 2.....	6
1.5 Einstellbare Spannungsregler.....	7
1.5.1 Messwerte 3.....	7
1.6 Differenzverstärker.....	8
1.6.1 Messwerte 4.....	9
2 Stromregler	10
2.1 Prinzip des Stromreglers.....	10
2.2 Einstellbare Stromregler.....	10
2.2.1 Messwerte 5.....	10
2.3 Nullpotential am Lastwiderstand 1.....	11
2.3.1 Messwerte 6.....	11
2.4 Nullpotential am Lastwiderstand 2.....	12
2.4.1 Messwerte 7.....	12
3 Kombination von Regelschaltungen	13
3.1 Stromregler im Spannungsregler 1.....	13
3.1.1 Messwerte 8.....	14
3.2 Stromregler im Spannungsregler 2.....	14
3.2.1 Messwerte 9.....	15
3.3 Stromregler im Spannungsregler 3.....	16
3.3.1 Messwerte 10.....	16
4 Zusätzliche Ergänzungen	17
4.1 Entlastung der Schalttransistoren.....	17
4.2 Rücklaufdiode.....	17
4.3 Spannungseinstellbarkeit bis Null.....	18
Literaturnachweise	18

1 Spannungsregler

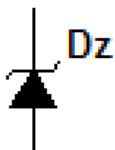
1.1 Prinzip des Spannungsreglers (SpgRegler1.ms10)

Ein Spannungsregler funktioniert im Prinzip durch den Ausgleich der Ausgangsspannung mit einer konstanten Spannung. In einfachster Form sieht der Schaltplan so aus:



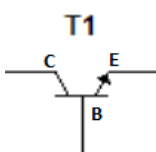
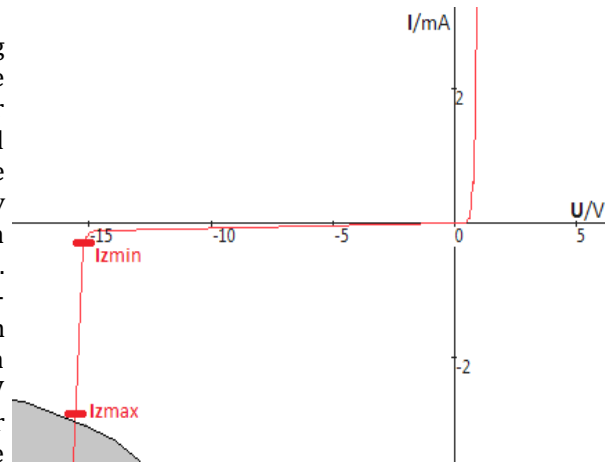
Der dargestellte Schaltplan hält die Spannung U_{RL} über eine gewisse Spanne an verschiedenen Werten für R_L und U_e nahezu konstant. Es handelt sich hierbei um eine Regelschaltung: Die Sollgröße wird durch die Durchbruchspannung von D_z bestimmt. Der Transistor vergleicht die Sollspannung mit der Ausgangsspannung und regelt den Zuflussstrom I_a , sodass $U_a = U_{RL}$ immer (annähernd) gleich U_z ist. $U_e = 20V$.

Für alle Spannungs- und Stromregler die hier erklärt werden, beträgt Gesamtleistung der Schaltung $U_e \cdot I_e$; die von R_L ist $U_a \cdot I_a$. Damit ist die Verlustleistung also $P_v = U_e \cdot I_e - U_a \cdot I_a$.



Das Verhalten der **Z-Diode** hat die besondere Eigenschaft, dass sich die Spannung U_z bei unterschiedlichen Strömen I_z kaum verändert. Dies ermöglicht dem Transistor zur Spannungsregelung über die Basis einen Strom zu entnehmen, ohne dass sich U_z maßgeblich verändert.

Die nebenstehende Abbildung verdeutlicht die Kennlinie der Z-Diode. Da die Diode in Sperrrichtung geschaltet ist, ist nur der linke, untere Teil von Bedeutung. Der Widerstand der Diode in Sperrrichtung ist für kleinere Spannungen sehr groß. Da D_z zusammen mit R_v einen Spannungsteiler darstellt, fällt also in diesem Bereich die komplette Eingangsspannung auf D_z . Da diese jedoch größer als die Durchbruchspannung ist, sinkt der Widerstand von D_z beim Überschreiten von 15V rapide, was zu einem Spannungsanstieg an R_v führt, bis U_z etwa 15V beträgt. Angenommen, die Höchstleistung P_{tot} der Diode betrage 45mW, so kann die graue Leistungshyperbel eingezeichnet werden. Hieraus ergibt sich dann $I_{zmax} = 3mA$. Als I_{zmin} wird im folgenden der kleinste Strom, der durch die Diode fließen kann, ohne dass U_z unter 15V absinkt, bezeichnet.



Der **Transistor** übernimmt in dieser Schaltung eine Regelfunktion. Sofern die Rahmenbedingungen dies hergeben, gilt $U_{BE} \approx 0,6V$ (Bei $U_{CE} > 0V$ verhält sich B-E wie eine Diode). Sollte diese Spannung überschritten werden, führt dies zu einem Regel-Stromfluss I_B , wobei mit diesem ein Strom I_C verbunden ist, für welchen (Bei ausreichender C-E-Spannung) gilt: $I_C \approx I_B \cdot B$. Gängige Transistoren, wie etwa der hier verwendete BD135 haben eine Stromverstärkung B von 70.¹ Auf jeden Abfall der Ausgangsspannung gegenüber der konstanten Z-Diodenspannung folgt also ein Anstieg von U_{BE} , welchen der Transistor sofort mit einem Stromfluss von $I_E = I_C + I_B$ kompensiert. Für einen ohmschen Verbraucher am Ausgang bedeutet der

1 <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/siemens/BD137-10.pdf>

Strom einen Anstieg der Spannung sodass die Ausgangsspannung solange ansteigt, bis U_{BE} wieder auf 0,6V gefallen ist und der Transistor den Strom reduziert.

Umgekehrt bedeutet ein Anstieg der Ausgangsspannung gegenüber U_z einen Abfall, bzw. negativen Wert von U_{BE} . Der Transistor reduziert dann sofort den Durchfluss und die Ausgangsspannung baut sich über den Verbraucher ab.

Durch den Transistor gilt für die Schaltung also der Zusammenhang $U_z = U_{BE} + U_A$.

Abhängig von kapazitiven Eigenschaften des Verbrauchers bzw. des Transistors sowie Regelverzögerungen kann die Regulation der Ausgangsspannung mit einem Auf- bzw. Entladevorgang verknüpft sein, welcher eine gewisse Zeitdifferenz hervorruft. Als Folgeerscheinung können höherfrequente Oberschwingungen der Ausgangsspannung auftreten, welchen Vermeidung sich das Kapitel *Glättungskondensator* widmet.

Die Leistung des Transistors berechnet sich aus $P_T = U_{CE} \cdot I_C + U_{BE} \cdot I_B$. Weil I_z im Verhältnis zu I_a meist sehr gering ist, fällt in dieser Schaltung also fast die gesamte Verlustleistung P_v an T_1 ab.



Der **Vorwiderstand** dient zum Schutz des Transistors und ist Teil des Spannungsteilers R_v -Dz. Der Wert des Vorwiderstands ist frei wählbar. Geringe Vorwiderstände sorgen für eine hohe Stabilität der Schaltung, weil dadurch der Strom I_z im Verhältnis zu I_B wächst und die Regelung weniger ins Gewicht fällt, jedoch besteht so auch eine größere Gefahr auf eine Überlastung des Regeltransistors. Um eine Überlastung der Diode zu verhindern

muss für den Vorwiderstand mindestens gelten $U_{e_{max}} / R_v < I_{z_{max}}$.

Soll die Schaltung kurzschlussicher sein, so kann der Widerstand über die Stromverstärkung B des Transistors und dessen maximalem Strom $I_{C_{max}}$ bei entsprechender Spannung berechnet werden: $R_v = (U_{e_{max}} - U_{BE}) \cdot B / I_{C_{max}}$. Sei $I_{C_{max}} = 2A$ und $B \approx 60$ (bei $I_C = 2A$), so erhält der Vorwiderstand einen Wert von 590Ω . Bei einer Eingangsspannung von 20V und 0V Ausgangsspannung bei Kurzschluss, muss der Transistor einer erheblichen Leistung von 40W standhalten. Für den hier verwendeten BD135 wäre dies zu viel, jedoch lassen sich vergleichbare Transistoren mit einer solchen Leistung finden.

Ist von der Eingangsspannungsquelle ein Innenwiderstand bekannt, so kann für $U_{e_{max}}$ hier die von I_e abhängige Eingangsspannung eingesetzt werden. I_e ist etwa gleich $I_{C_{max}}$, weil die Regelströme hier kaum ins Gewicht fallen.

Ist für die Schaltung ein maximaler Ausgangsstrom bekannt, bis zu welchem die Spannung konstant gehalten werden soll, so kann nach der Formel $I_B = I_E / (B + 1)$ der dafür notwendige, maximale Basisstrom berechnet werden, wobei $I_E = I_a$. Dieser fließt zusammen mit I_z durch R_v . Weil bei dieser Höchstbelastung U_z immer noch 15V betragen soll, muss I_z also dem im Abschnitt Z-Diode beschriebenen Strom $I_{z_{min}}$ entsprechen. Mit $I_{R_v} = I_{z_{min}} + I_B$ und $U_{R_v} = U_E - U_z$ ergibt sich so ein Wert von $R_v = 100\Omega$, wenn $I_{a_{max}}$ gleich 2A sein soll.

1.1.1 Messwerte 1

Der Spannungsregler liefert in dieser einfachen Form folgende Messwerte ($R_v = 590\Omega$):

R_L/Ω	∞	1000	100	50	20	10	5	2	1	0,1	0
U_L/V	14,53	14,3	14,21	14,14	13,88	10,84	7,13	3,47	1,87	0,2	0
I_L/A	0	0,01	0,14	0,28	0,69	1,08	1,43	1,74	1,87	2	2,01
I_B/mA	0	0,12	?	?	?	14	20	26	29	32	32
U_z/V	14,99	14,98	14,97	14,95	14,78	11,82	8,19	4,59	3	1,36	1,17
$I_z/\mu A$	8500	8389	?	?	?	1,78	0,89	0,89	0,89	0,03	0

Aus diesen Werten ergibt sich ein Quelleninnenwiderstand von:

R_i/Ω	-23	-0,69	-0,5	-0,63	-7,79	-10,6	-11,81	-12,31	-12,85	-20
--------------	-----	-------	------	-------	-------	-------	--------	--------	--------	-----

Diese Stabilität ist für eine geregelte Spannungsquelle eher schlecht. Deswegen kann ein solcher Spannungsstabilisator eigentlich nur mit Kurzschlussrisiko betrieben werden. Messwerte ($R_v = 100\Omega$):

R_L/Ω	∞	1000	100	50	20	10	5	2	1	0.1	0
U_L/V	14,71	14,48	14,39	14,35	14,23	14,05	13,29	8,08	4,79	0,57	0
I_L/A	0	0,01	0,14	0,29	0,71	1,41	2,66	4,04	4,79	5,68	5,79
I_B/mA	0	0,12	?	?	?	?	?	104	135	175	181
U_Z/V	15,16	15,16	15,16	15,15	15,14	15,11	14,59	9,65	6,51	2,46	1,91
$I_Z/\mu A$	48000	48000	?	?	?	?	?	1,78	0,89	0,89	0

Jetzt ergeben sich folgende Quelleninnenwiderstände:

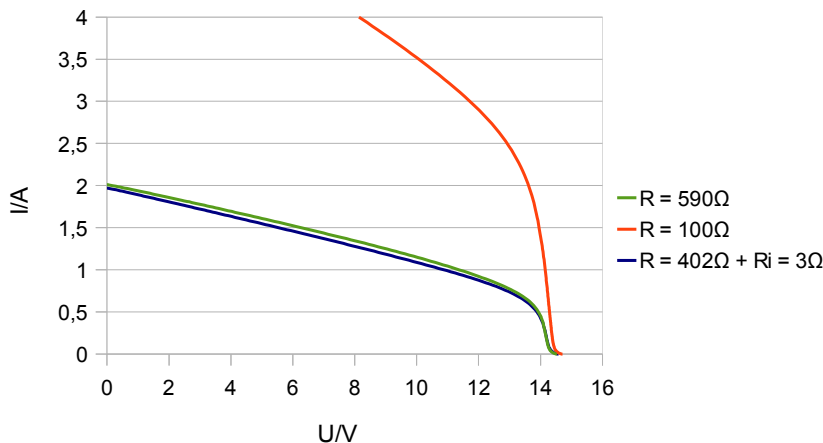
R_i/Ω	-23	-0,69	-0,27	-0,29	-0,26	-0,6	-3,78	-4,39	-4,74	-5,18
--------------	-----	-------	-------	-------	-------	------	-------	-------	-------	-------

Verbessern lässt sich die Stabilität auch durch Erhöhen der Eingangsspannung gegenüber der Ausgangsspannung; jedoch sinkt dadurch der Wirkungsgrad und R_v müsste erneut angepasst werden – besonders, weil die Leistung des Transistors im Kurzschlussfall dadurch vergrößert werden würde, was einen geringeren Maximalstrom zur Folge hätte.

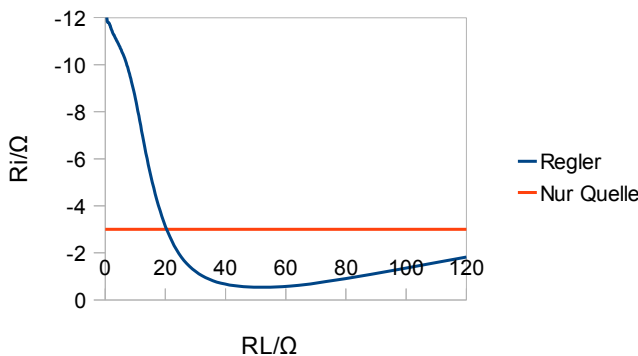
Bei den folgenden Messwerten wird nun noch eine veränderliche Eingangsspannung mit einem R_i von 3Ω simuliert. Für Kurzschlusssicherheit ergibt sich für R_v nun 402Ω :

R_L/Ω	∞	1000	100	50	20	10	5	2	1	0,1	0
U_L/V	14,58	14,34	14,2	14,17	13,77	10,48	6,92	3,38	1,82	0,2	0
I_L/A	0	0,01	0,14	0,28	0,69	1,05	1,38	1,69	1,82	1,96	1,97
R_i/Ω	-24	-1,08	-0,21	-0,98	-9,14	-10,79	-11,42	-12	-11,57	-20	

Die I-U-Kennlinien dieser Spannungsstabilisatoren sehen so aus:



Bei einem perfekten Spannungsregler müsste die Kennlinie im Regelbereich senkrecht verlaufen.



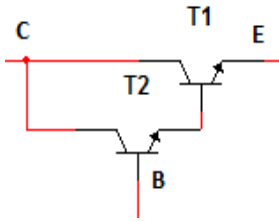
Das zweite Diagramm zeigt den Verlauf des Innenwiderstandes der unregelmäßigen Quelle und des letzten Spannungsstabilisators (mit $R_i = 3\Omega$ bei der Eingangsspannung).

Etwas Überraschend ist in dieser letzten Wertetabelle der große Innenwiderstand zwischen Leerlauf und 1000Ω . Jedoch ist dieser, wie das Diagramm veranschaulicht, kaum von Relevanz, da bei großen Lastwiderständen der Quelleninnenwiderstand kaum ins Gewicht fällt.

Ab etwa 20Ω Lastwiderstand würde sich also diese Schaltung lohnen.

Im Folgenden wird der Innenwiderstand von 3Ω für alle Spannungsregler beibehalten.

1.2 Doppelte Transistoren (SpgRegler2.ms10)



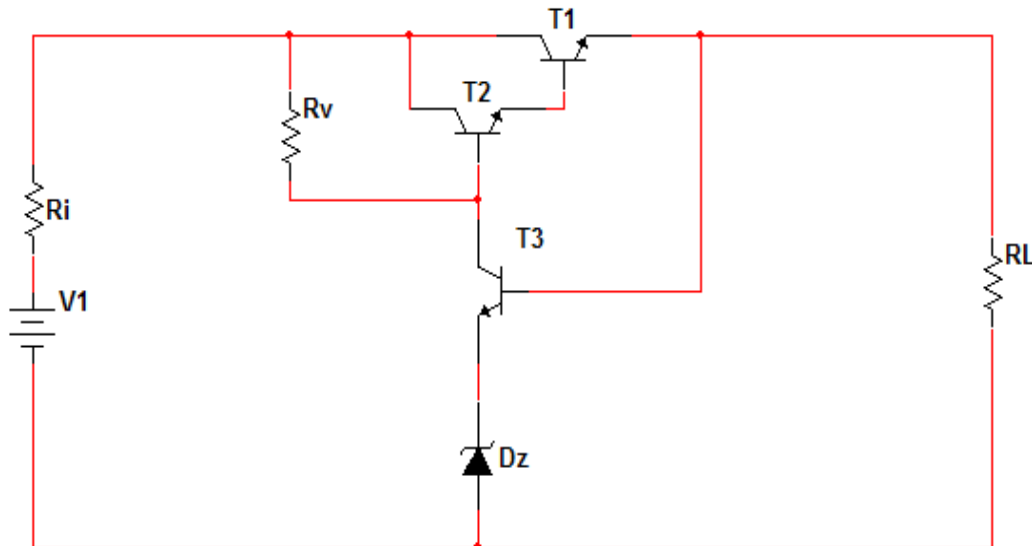
Bereits eine beachtliche Verbesserung der Schaltung kann erreicht werden, indem man den Transistor T1 durch zwei baugleiche Modelle ersetzt, genannt **Darlington-Schaltung** ($T1 \& T2 = T'$). Zur Berechnung des Vorwiderstandes können diese zu einem Ersatzschaltbild gemäß nebenstehender Abbildung zusammengefasst werden. Nun gilt $U_{BE}' = 2 * U_{BE} \approx 1,2 \text{ V}$. Für die neue Stromverstärkung gilt dann $B' = B1 + B2 + B1 * B2$. Problematisch ist, dass aufgrund der unterschiedlichen Eingangsströme I_{B1} und I_{B2} die Stromverstärkung der Transistoren unterschiedlich ausfällt.

Um einen ausreichen genauen, kurzschlussicheren Vorwiderstand zu finden, muss also schrittweise vorgegangen werden: Bei $I_{C1max} = 2 \text{ A}$ hat T1 eine Stromverstärkung von etwa 60.¹ $I_{B1} = I_{E2}$ darf also höchstens 33,33mA betragen. Bei Strömen dieser Größe beträgt die Stromverstärkung von T2 etwa 100. Mit $I_B = I_E / (B + 1)$ ergibt I_{B2} dann 0,33mA. R_v muss also nach $R_v = (U_e - U_{BE}') / I_{B2}$ ungefähr 38,4k Ω haben.

Im Weiteren werden diese Regeltransistoren als Zuflusssteuerung verwendet, die Ausgangsspannung wird von einem neuen Transistor T3 übernommen, welcher nun nicht mehr die komplette Last schalten muss und somit empfindlichere Ströme steuern kann.

1.3 Separater Regeltransistor 1 (SpgRegler3.ms10)

Es ist möglich, eine weitere Einspeisung von vor T1 und T2 in Form einer Konstant-Stromquelle an Stelle von R_v anzubringen; dazu mehr im Kapitel *Stromregler im Spannungsstabilisator 1*. Zur verbesserten Stabilität der Schaltung wird hier ein zusätzlicher Regeltransistor von hinter T1 und T2 versorgt:



Durch diese Zusammenstellung ergeben sich zwei Regeleinrichtungen. Grundsätzlich gilt: Die Transistoren T1 und T2 sind zunächst geöffnet (Wegen R_v) und es baut sich eine Ausgangsspannung auf. Der Transistor T3 öffnet zunächst nicht, da die Ströme über dessen Basis durch die Z-Diode fließen müssen, welche jedoch undurchlässig bleibt, bis $U_z = U_a - U_{BE3}$ die Durchbruchspannung überschreitet. Erst dann fließen Ströme über T3, welche den Widerstand R_v passieren müssen. An diesem fällt nun eine Spannung ab ($U_{Rv} = R_v * (I_{C3} + I_{B2})$).

T1 und T2 regeln nun U_a also nach $U_e - U_{Rv}$. Eine Erhöhung der Eingangsspannung etwa führt nun zu einem Anstieg der Ausgangsspannung, welchen T3 sofort mit einem Stromfluss und der damit verbundenen Erhöhung von U_{Rv} kompensiert – T1 und T2 reduzieren dann den Strom und die Ausgangsspannung bleibt konstant.

Die doppelten Transistoren bringen in dieser Schaltung den Nachteil mit sich, dass R_v bei Kurzschlussicherheit sehr groß sein muss, was die Stabilität von U_z reduziert. Je nach Transistortyp bringt für Kurzschlussicherheit daher eventuell ein Verzicht auf die Darlington-Schaltung einen kleinen Vorteil. Weil hier jedoch angestrebt wird, dass später ein Stromregler den Höchststrom begrenzt, werden weiterhin Darlington-Transistoren verwendet.

1 <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/siemens/BD137-10.pdf>

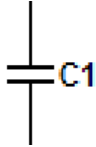
Weil R_v auch den Höchststrom für die Z-Diode begrenzt, kann für T_3 ein empfindlicherer Transistor verwendet werden, dessen Maximalstrom I_{Cmax} den – der Z-Diode nicht wesentlich übersteigt; zum Beispiel der 2SC2001.¹ Da nun T_3 die Regelung übernimmt, kann nun für T_1 (in der Praxis) ein Leistungstransistor verbaut werden, die in den folgenden Schaltungen größeren Spannungsdifferenzen standhält. Außerdem wird T_3 so kaum von Erwärmungserscheinungen beeinflusst.

Weil sich nun die Ausgangsspannung nach $U_z + U_{BE3}$ richtet, muss nun eine andere Z-Diode mit $U_z = U_a - U_{BE3}$, also etwa 13,4V verwendet werden.

Auch hier gilt: Je kleiner R_v , desto besser ist die Stabilität. Es wird R_v nach dem im Kapitel *doppelte Transistoren* beschriebenen Prinzip kurzschlussicher auf 38,4kΩ gesetzt.

Durch diese Selbstregelung des Sollwertes (U_z) können starke Oberschwingungen der Ausgangsspannung auftreten, weswegen nun ein Glättungskondensator notwendig wird.

1.4 Glättungskondensator (SpgRegler4.ms10)



Der **Glättungskondensator** wird Parallel zu R_L geschaltet und dient zur Verminderung der Oberschwingungen der Ausgangsspannung. Der Kondensator wirkt, in dem er die hohen Frequenzen kurzschließt wie ein Tiefpass. Je größer dessen Kapazität, desto glatter ist die Ausgangsspannung. Für diesen Fall ausreichend ist ein 10μF-Kondensator.

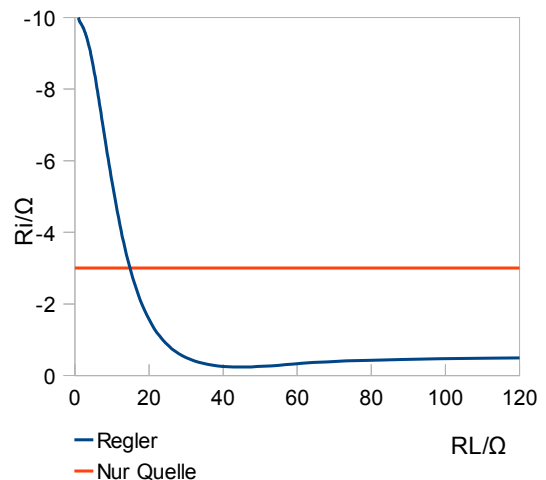
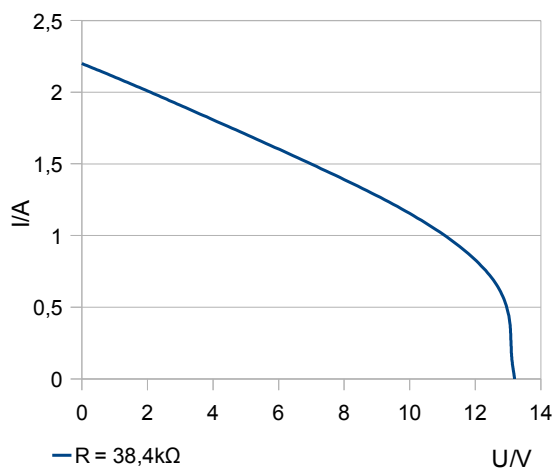
Wenn im Weiteren Strom- und Spannungsregler kombiniert werden, könnte ein zu großer Kondensator kurzzeitig hohe Ausgangsströme zulassen. Außerdem können die längeren Ladezeiten eines großen Kondensators durch deren Ladeströme die Regeltransistoren beschädigen, wenn die Schaltung nicht für Kurzschlüsse abgesichert wurde.

1.4.1 Messwerte 2

Der Spannungsregler liefert nun folgende Messwerte:

R_L/Ω	∞	1000	100	50	20	10	5	2	1	0,1	0
U_L/V	13,2	13,2	13,1	13,1	13	10,8	7,33	3,68	2,01	0,22	0
I_L/A	0	0,01	0,13	0,26	0,65	1,08	1,47	1,84	2,01	2,18	2,2
$I_{B3}/\mu A$	3,11	0,83	0,73	0,62	0,24	0	0	0	0	0	0
U_z/V	12,6	12,6	12,6	12,5	12,4	10,5	7,01	3,39	1,73	0,04	0,02
$I_z/\mu A$	193	145	125	103	34,9	0	0	0	0	0	0
R_i/Ω		?-0,1	-0,83	-0,1	-0,26	-5,12	-8,9	-9,86	-9,82	-10,53	-11

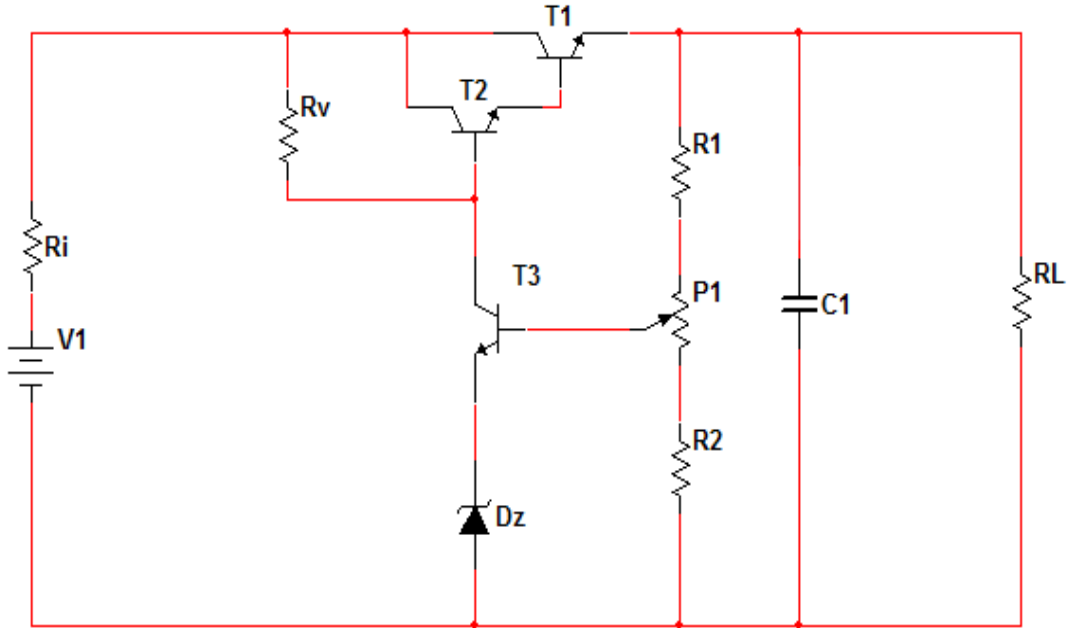
Diese Stabilität ist nun wesentlich höher als zuvor.



1 http://www.datasheetcatalog.org/datasheets2/15/157926_1.pdf

1.5 Einstellbare Spannungsregler (SpgRegler5.ms10)

Durch die Einspeisung von T3 ergibt sich die Möglichkeit, über einen Spannungsteiler nur einen Teil der Ausgangsspannung an U_z anzupassen. Verbindet man den Spannungsteiler mit einem Potentiometer, so lässt sich dieser Anteil der Ausgangsspannung verändern, wodurch die Gesamtausgangsspannung veränderbar wird:



Durch das Poti lässt sich der Widerstand von $R1'$ (über der Einspeisung) vergrößern und der von $R2'$ (unter der Einspeisung) verringern, oder umgekehrt. T3 regelt den Strom nun so, dass U_a so angepasst wird, dass $U_{R2'} = U_z + U_{BE3}$ ist. Dabei gilt $U_{R2'} = U_a \cdot R2' / (R1' + R2')$, also $U_a = U_{R2'} \cdot (R1' + R2') / R2'$, sofern I_{B3} hier ignoriert wird. Ist z.B. $R1 = 321\Omega$, $R2 = 5k\Omega$, $P1 = 17k\Omega$ und $U_z = 5V$, so beträgt die Ausgangsspannung im Regelbereich maximal 25V und minimal 5,68V.

Um eine stabile Regelung zu gewährleisten muss die Eingangsspannung nun auf mindestens den Maximalwert (Im Beispiel auf 40V) erhöht werden, wenn U_z nicht noch weiter verringert werden soll. Dadurch muss R_v nun auf 98,4k Ω gesetzt werden. In der Praxis müsste T1 nun Leistungen von bis zu 68W standhalten.

1.5.1 Messwerte 3

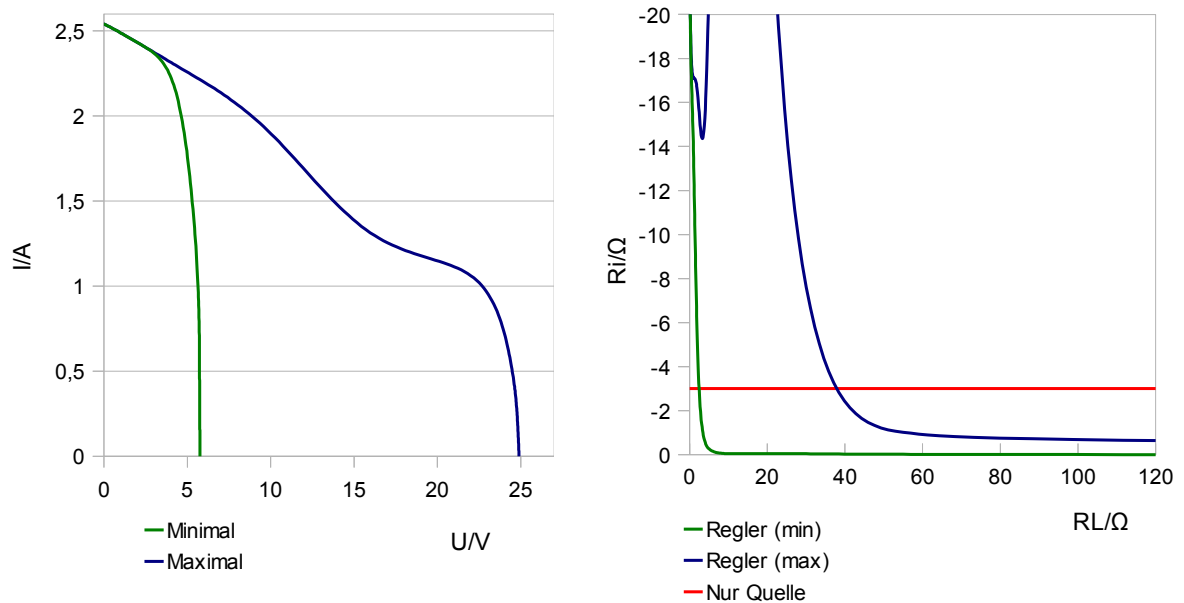
Der Spannungsregler liefert jetzt folgende Messwerte (Minimalspannung):

R_L/Ω	∞	1000	100	50	20	10	5	2	1	0,1	0
U_L/V	5,75	5,75	5,75	5,75	5,74	5,73	5,69	4,56	2,41	0,25	0
I_L/A	0	0,01	0,06	0,12	0,29	0,57	1,14	2,28	2,41	2,53	2,54
R_i/Ω		?0	?0	?-0,01	-0,06	-0,04	-0,07	-0,99	-16,54	-18	-25

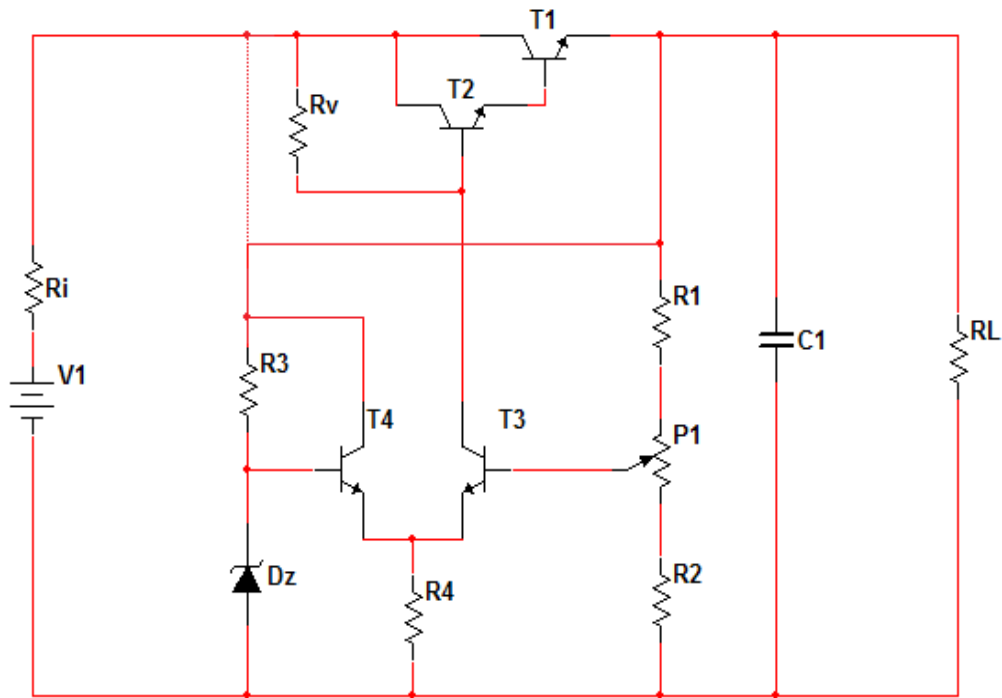
Die Stabilität der Schaltung geht mehr und mehr verloren, je größer $R1'$ ist (Maximalspannung):

R_L/Ω	∞	1000	100	50	20	10	5	2	1	0,1	0
U_L/V	24,9	24,9	24,8	24,6	23,1	16,1	9,89	4,57	2,41	0,25	0
I_L/A	0	0,02	0,25	0,49	1,16	1,16	1,98	2,28	2,41	2,53	2,54
R_i/Ω		?0	-0,43	-0,83	-2,24	-100	-7,57	-17,73	-16,62	-18	-25

Wie das Diagramm verdeutlicht, kann diese Schaltung die Spannung bis zu 1A konstant halten:



1.6 Differenzverstärker (SpgRegler6.ms10)



Eine weitere Verbesserung ergibt sich durch das Separieren des Dz-Spannungsteilers: Durch den Spannungsteiler R3-Dz ist U_z wieder konstant. Der neue Transistor T4 (2SC2001) hält die Spannung U_{R4} konstant zu U_z ($U_{R4} = U_z - U_{BE4}$). T3 regelt den Strom durch R_v wieder so, dass Der Anteil von U_a an $R_2' = U_{R4} + U_{BE3}$ ist. Weil aber dieser Strom ebenfalls durch R_4 fließt und R_4 im Gegensatz zur Diode auf diesen Strom mit einem Spannungsanstieg reagiert, reduziert T4 den Zuflussstrom. Die Spannung an R_4 bleibt also im Regelbereich konstant. Die Summe $I_{E4} + I_{E3}$ bleibt gleich. Die Z-Diode wird von der Regelung so noch weniger beeinflusst.

Durch zu große Werte von R_4 besteht die Gefahr, dass bei einem Anstieg von U_{R2}' , also einem gewollten Absinken der Ausgangsspannung, auf welchen T3 mit einem Strom, der die Ausgangsspannung senken soll, reagiert, dieser Strom, der auch durch R_4 fließt, die Spannung U_{R4} soweit anhebt, dass T4 den Zufluss nicht weit genug senken kann und $U_{R4} + U_{BE3}$ den Wert von U_{R2}' bereits übersteigt, bevor U_a geregelt wurde, und es zu einem längerfristigen Aussetzen der Spannungseinstellbarkeit kommen kann. Mit einem Wert von $5\text{k}\Omega$ für R_4 ist dieses Risiko hier jedoch zu vernachlässigen.

Wenn die Mindestaussgangsspannung von letzter Schaltung erhalten bleiben soll, muss außerdem Uz um UBE4 angehoben werden (auf 5,6V).

Der Differenzverstärker ermöglicht es außerdem, die Versorgung der Z-Diode von vor T1 und T2 vorzunehmen (gestrichelte Verbindung). In Multisim ist hier ein Schalter eingebaut. Dies kann bei der Kombination von mehreren Schaltungen relevant sein.

1.6.1 Messwerte 4

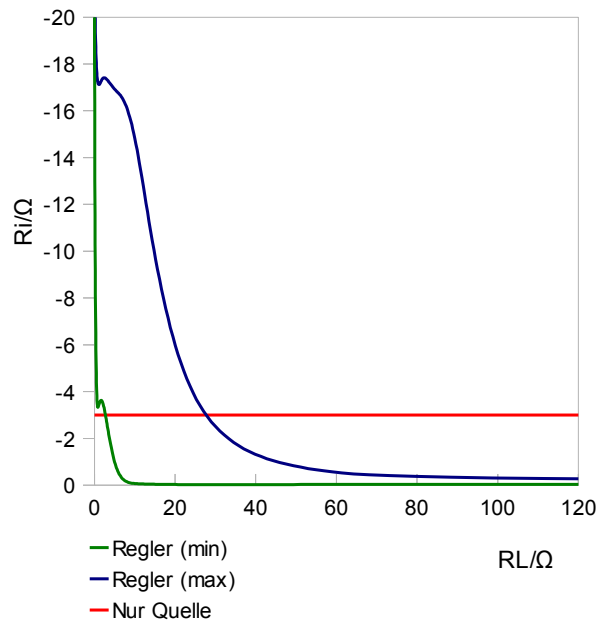
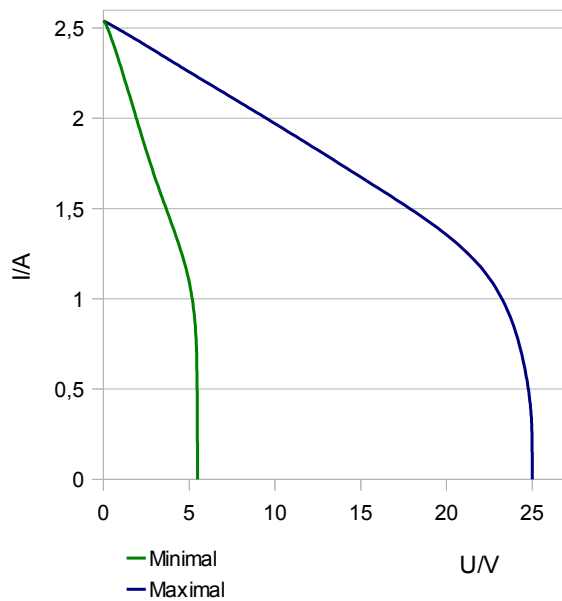
Diese Schaltung liefert nun folgende Werte (Minimale Ausgangsspannung):

RL/ Ω	∞	1000	100	50	20	10	5	2	1	0,1	0
UL/V	5,49	5,49	5,48	5,48	5,48	5,46	5,38	3,2	1,98	0,25	0
IL/A	0	0,01	0,05	0,11	0,27	0,55	1,08	1,6	1,98	2,53	2,54
IR1'/mA	0,87	0,87	0,88	0,88	0,9	0,92	0,97	0,5	0,27	0,01	0
UZ/V	5,42	5,42	5,42	5,42	5,42	5,41	5,33	3,18	1,96	0,25	0
UR4/V	4,81	4,81	4,8	4,8	4,8	4,79	4,71	2,57	1,38	0	0
Ri/ Ω	?-0,03	-0,04	-0,03	-0,02	-0,05	-0,15	-4,19	-3,21	-3,15	-25	

Die Stabilität ist jetzt sehr gut, jedoch wird auch diese Schaltung instabil, wenn R1' steigt (Maximale Ausgangsspannung):

RL/ Ω	∞	1000	100	50	20	10	5	2	1	0,1	0
UL/V	25	25	25	24,9	23,3	16,1	9,9	4,57	2,41	0,25	0
IL/A	0	0,03	0,25	0,5	1,17	1,61	1,98	2,28	2,41	2,53	2,54
IR1'/mA	3,92	3,92	3,94	3,96	3,81	2,77	1,86	0,99	0,47	0,01	0
UZ/V	5,64	5,64	5,64	5,64	5,64	5,62	5,59	4,52	2,38	0,25	0
UR4/V	5,02	5,02	5,02	5,02	5,02	5	4,97	3,9	1,78	0	0
Ri/ Ω	?0	?-0,1	-0,3	-2,39	-16,36	-16,76	-17,77	-16,62	-18	-25	

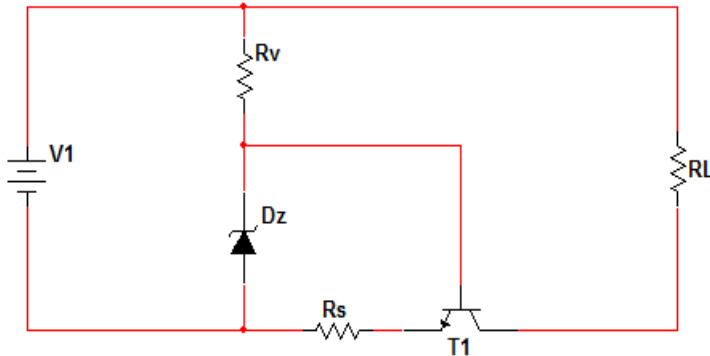
Dieser Spannungsregler hält die Ausgangsspannung für Ströme bis zu 1A sehr konstant. Wird später diese Schaltung mit einem Stromregler kombiniert, so kann der Vorwiderstand verringert werden, sodass ein höherer Maximalstrom im Regelbereich zulassen wird und die Stabilität steigt.



2 Stromregler

2.1 Prinzip des Stromreglers (StrRegler1.ms10)

Stromregler funktionieren im Grundprinzip zunächst wie Spannungsregler. Der Unterschied besteht darin, dass R_L vor dem Kollektor des Transistors platziert wird; an die ehemalige Stelle von R_L tritt ein konstanter Widerstand R_s . Wird für diesen die Spannung konstant gehalten, so bedeutet dies einen ebenfalls konstanten Strom, welcher nun auch durch R_L fließt.



Weil R_s nun einen Verlust darstellt, kann eine Verbesserung des Wirkungsgrades erreicht werden, indem U_z verringert wird (Auf 3,2V). Der Sollstrom errechnet sich (Wenn I_{B1} vernachlässigt wird) somit aus $I_L = (U_z - U_{BE1}) / R_s$. Weil jetzt auch der Höchststrom durch den Transistor durch diese Gleichung gegeben ist, kann R_v verringert werden, um die Stabilität zusätzlich zu verbessern.

Unter Mitkalkulation von I_B ergibt so ein Wert von $R_s = 2,68\Omega$ ein I_L von etwa 1A.

Für T_1 kann hier eine weitere Belastung auftreten: Wenn sich die Schaltung im Leerlauf befindet kann U_{R_s} nicht an U_z angepasst werden. In diesem Fall öffnet der Transistor über Basis maximal, weswegen R_v den maximalen Basisstrom begrenzen muss. Weil in diesem Fall wahrscheinlich U_z unter die Durchbruchspannung fällt, ist ein genauer Wert für R_v hier schwer zu ermitteln, was aber auch gar nicht notwendig ist. Mit der Gleichung $R_v = (U_{e_{max}} - I_{B_{max}} * R_{s_{min}}) / I_{B_{max}}$ kann ein notwendiger Wert für R_v geschätzt werden. R_v darf außerdem nicht kleiner als $(U_{e_{max}} - U_{z_{max}}) / I_{z_{max}}$ sein. Mit $R_v = 100\Omega$ ist R_v auch für den im Folgenden verwendeten R_s von $1,22\Omega$ ausreichend ($I_{B_{max}} = 200\text{mA}$).

2.2 Einstellbare Stromregler (StrRegler2.ms10)

Stromregler werden leicht einstellbar, wenn R_s durch ein Potentiometer ersetzt wird. Wird R_s auf $1,22\Omega$ herabgesetzt, so ergibt sich ein Ausgangsstrom von 2A, was der Höchstbelastung von T_1 entspricht. Wird zu R_s in Reihe ein Poti von maximal 10Ω geschaltet, so lässt sich der Ausgangsstrom antiproportional zwischen 2A und etwa 0,27A einstellen.

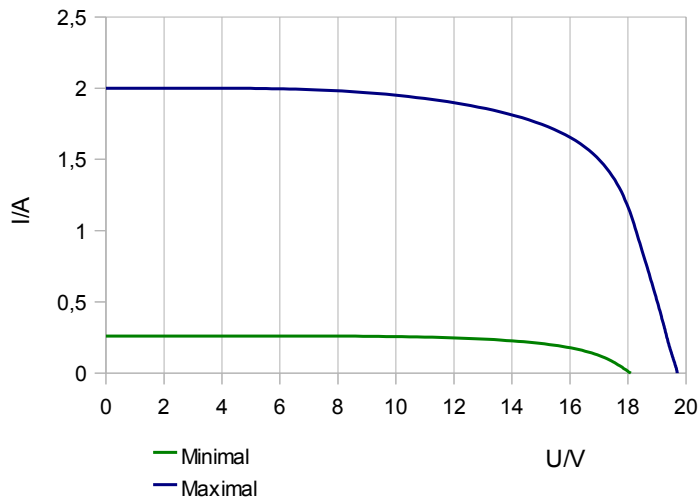
2.2.1 Messwerte 5

Der Stromregler in dieser Form liefert nun folgende Werte (minimaler Ausgangsstrom):

R_L/Ω	∞	1000	100	50	20	10	5	2	1	0,1	0
I_L/A	0	0,02	0,17	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
U_L/V	18,1	17,9	17,2	12,8	5,12	2,56	1,28	0,51	0,26	0,03	0
I_{B1}/mA	170	166	70,5	2,37	2,29	2,26	2,24	2,24	2,23	2,23	2,23
U_{R_s}/V	1,9	2,06	2,72	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9
G_i/mS		-100	-214,3	-20,45	?	?	?	?	?	?	?

(Maximaler Ausgangsstrom):

R_L/Ω	∞	1000	100	50	20	10	5	2	1	0,1	0
I_L/A	0	0,02	0,19	0,38	0,92	1,72	1,99	2	2	2	2
U_L/V	19,7	19,7	19,4	19,2	18,4	17,2	9,97	3,99	2	0,2	0
I_{B1}/mA	188	188	186	183	175	120	35,1	33,8	33,4	33	33
U_{R_s}/V	0,23	0,25	0,46	0,69	1,33	2,25	2,47	2,48	2,48	2,48	2,48
G_i/mS		?-1000	-566,7	-950	-675	-666,7	-37,34	-1,67	?	?	?

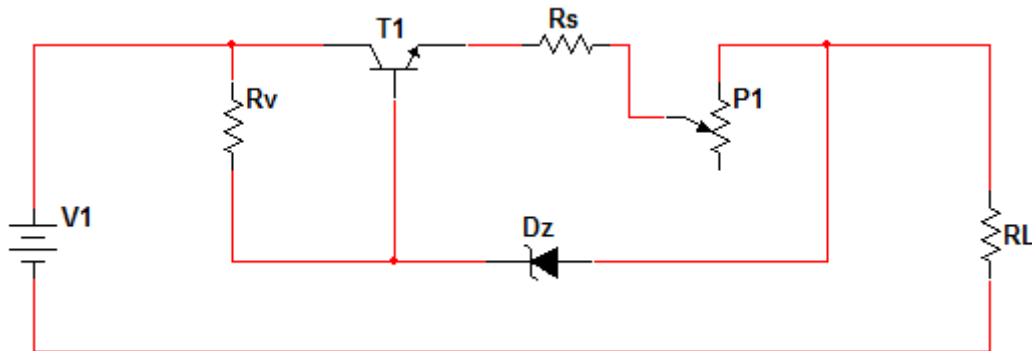


Für einen perfekten Stromregler muss die I-U-Kennlinie im Regelbereich waagrecht sein.

Zur Regelung des Stromes steht fast die komplette Eingangsspannung zur Verfügung; die Regelung ist in diesem Bereich (verglichen mit den Spannungsreglern) sehr gut. Ein Hauptproblem der Stromregler ist das fehlende Nullpotential am Lastwiderstand.

2.3 Nullpotential am Lastwiderstand 1 (StrRegler3.ms10)

Ein Nullpotential am Lastwiderstand kann erreicht werden, indem die Schaltung wie folgt umgebaut wird:



Der Strom I_L muss hier auch R_s passieren. Dadurch fällt an diesem eine Spannung ab, welche zu einem Schließen des Transistors führt, sobald diese größer als $U_{BE1} + U_z$ wird. Jedoch ist bereits das Öffnen des Transistors grenzwertig: Zunächst liegt an D_z fast keine Spannung an. T_1 ist undurchlässig und wird erst durch I_{Rv} , welcher zunächst komplett durch die Basis fließt, geöffnet. Erst wenn die Spannung an D_z die Durchbruchspannung überschreitet, nimmt D_z dem Transistor den Strom I_{Rv} weg. Jedoch variiert U_z in dieser Schaltung stark, weil sich U_{CE} verändert (Bei konstantem Strom ist U_{Rs} immer gleich, jedoch U_a von R_L abhängig, was U_{CE1} als einzig übrige Spannung in diesem Spannungsteiler ebenfalls veränderlich macht), und so der Spannungsteiler R_v - D_z sehr unterschiedlich belastet wird. Außerdem kommt zum Ausgangsstrom der nicht geregelte Strom I_z hinzu. Unglücklicher Weise „zeigen“ beide Effekte in die gleiche Richtung: für geringere Lastwiderstände wird der Strom größer. Diese Schaltung weist also eine wesentlich schlechtere Stabilität auf.

Bei $R_s = 1,22\Omega$ beträgt der Ausgangsstrom laut Messung maximal 2,16A.

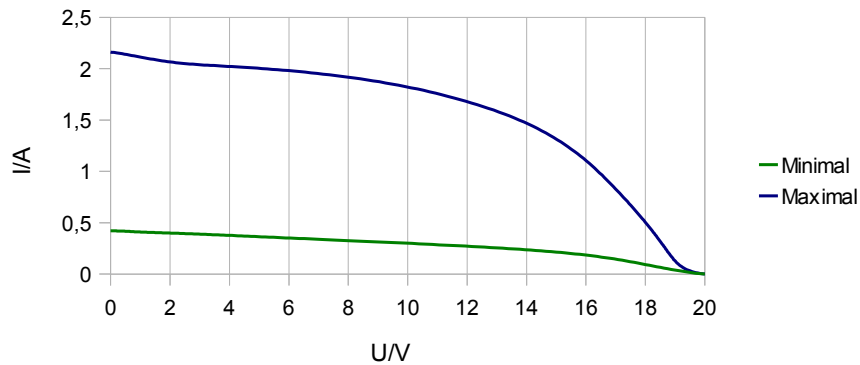
2.3.1 Messwerte 6

Dieser Stromregler liefert folgende Werte (minimaler Ausgangsstrom):

R_L/Ω	∞	1000	100	50	20	10	5	2	1	0,1	0
I_L/A	0	0,02	0,17	0,26	0,34	0,38	0,4	0,41	0,42	0,42	0,42
U_L/V	20	19,1	17,1	13,2	6,85	3,77	1,99	0,82	0,42	0,04	0
I_z/mA	0	0,01	1	32,6	9,35	124	141	153	157	160	161
U_{Rs}/V	0	0,21	1,9	2,59	2,79	2,85	2,87	2,89	2,89	2,9	2,9

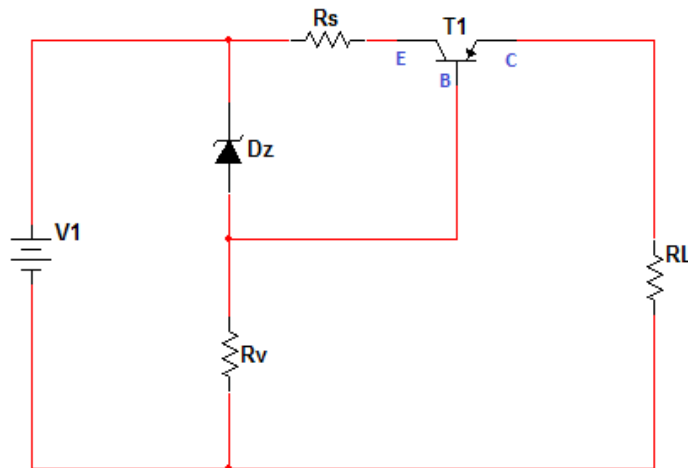
(Maximaler Ausgangsstrom):

R_L/Ω	∞	1000	100	50	20	10	5	2	1	0,1	0
I_L/A	0	0,02	0,19	0,37	0,85	1,47	1,9	2,03	2,04	2,16	2,16
U_L/V	20	19,3	18,8	18,4	17	14,7	9,52	4,05	2,04	0,22	0
I_Z/mA	0	0	0,01	0,01	0,04	2,42	?	?	?	128	131
U_{Rs}/V	0	0,02	0,23	0,45	1,04	1,79	?	?	?	2,48	2,48



2.4 Nullpotential am Lastwiderstand 2 (StrRegler4.ms10)

Auch mit einem PNP-Transistor ist es möglich, ein Nullpotential am Lastwiderstand zu erreichen:



Bei einem PNP-Transistor sind die Spannungen negativ. Während beim NPN-Transistor der Arbeitspunkt für $U_{CE} > 0V$ bei $U_{BE} = 0,6V$ und für $U_{CE} < 0V$ bei $U_{BC} = 0,6V$ ist, und der Strom I_B in den Transistor hinein fließt, ist beim PNP-Transistor der Arbeitspunkt für $U_{EC} > 0V$ bei $U_{BE} = -0,6V$ und für $U_{EC} < 0V$ bei $U_{BC} = -0,6V$, und der Strom I_B fließt vom Transistor weg. T1 hält hier also U_{Rs} konstant zu $Dz + (-0,6V)$.

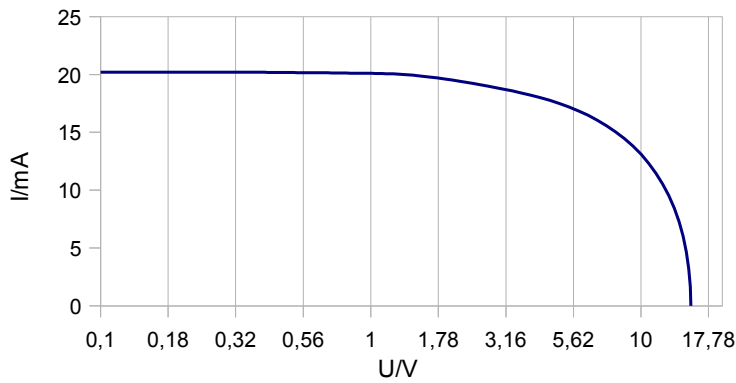
Anzumerken ist, dass die jeweils letzter genannten Arbeitspunkte sehr schlechte Kennlinien haben.

Es ist bei dieser Schaltung schwierig, große Ausgangsströme zu erreichen. Soll I_a gleich 20mA sein, so ergibt I_{Rs} (bei entsprechendem Basisstrom) 22mA und bei $U_z = 5,3V$ R_s damit 215 Ω .

2.4.1 Messwerte 7

Dieser Stromregler liefert folgende Werte:

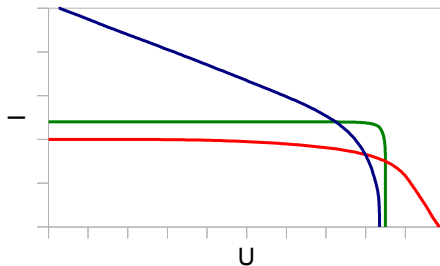
R_L/Ω	∞	1000	100	50	20	10	5	2	1	0,1	0
I_L/mA	0	15,2	20	20,1	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2
U_L/V	15,3	15,2	2	1,01	0,4	0,2	0,1	0,04	0,02	0	0
I_B/mA	21,8	6,87	2,2	2,08	2,02	2	1,99	1,98	1,98	1,98	1,98
U_{Rs}/V	4,68	4,74	4,77	4,78	4,78	4,78	4,78	4,78	4,78	4,78	4,78



Diese Kennlinie wirkt auf den ersten Blick nicht schlecht, jedoch reicht der Regelbereich in der hier logarithmischen Darstellung nur bis knapp 2V.

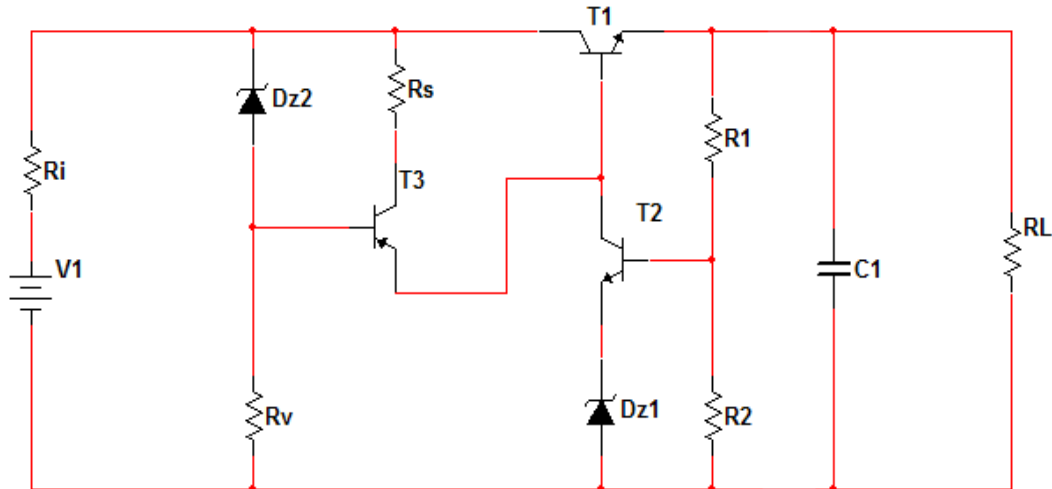
3 Kombination von Regelschaltungen

3.1 Stromregler im Spannungsregler 1 (KombRegler1.ms10)



Bei der Kombination von Regelschaltungen wird versucht, bestehende Schaltungen zu verbessern oder einen Stromregler im Spannungsregler zu integrieren, sodass für größere Lastwiderstände die Spannung konstant gehalten wird und für kleinere Lastwiderstände die Stromregelung einsetzt. Die nebenstehende Abbildung zeigt die Kennlinien der bisher besten Spannungsquelle (Blau) und der bisher besten Stromquelle (Rot) übereinandergelegt. Die grüne Kennlinie wäre hier der Optimalfall.

In der folgenden Schaltung wird versucht, durch eine Stromquelle nach Vorlage StrRegler4 in der Spannungsquelle nach Vorlage SpgRegler5, hin zu einer solchen Kennlinie zu kommen:

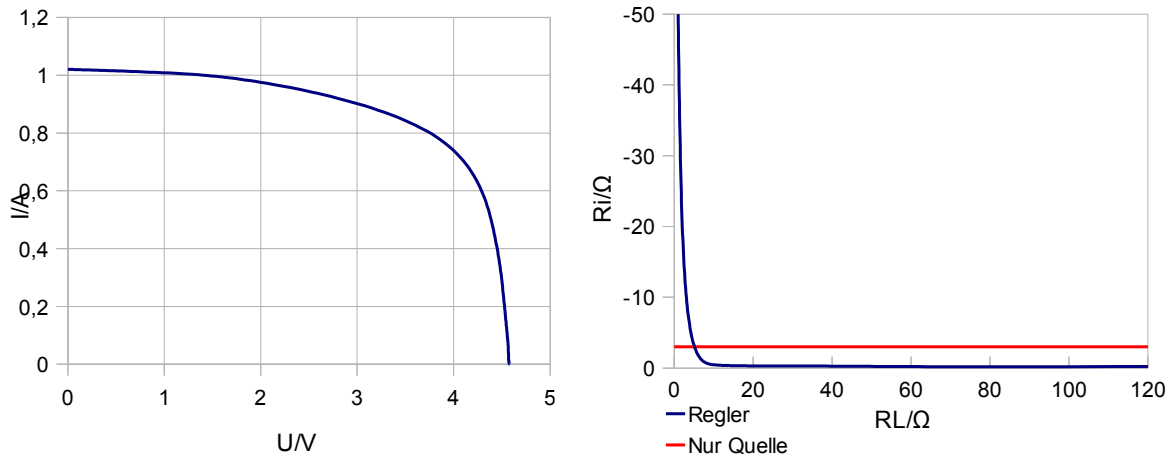


Bei dieser Schaltung wird auf die Darlington-Transistoren verzichtet. Der Strom I_{E3} wird von der Stromquelle konstant gehalten und muss, damit der Ausgangsstrom maximal 1A beträgt, auf 12,2mA eingestellt sein. Dies wird durch ein R_s von 230 Ω erreicht.

Etwas aufwändiger ist es, die notwendige Stabilität der Stromquelle bzw. die Ausgangsspannung zu bestimmen: Die Stromregelung ist auf 1A eingestellt. Laut Ohm'schen Gesetz liegt damit der Schnittpunkt zwischen Spannungs- und Stromregelung bei einem Lastwiderstand von $R_L = U_a / 1A$. Für geringere Widerstände ist T1 geöffnet. Im Schnittpunkt liegt dann bereits die gesamte Ausgangsspannung U_a an und es fließt immer noch ein Strom von 1A. In diesem Punkt ist der spannungsregelnde Transistor T2 (theoretisch) noch geschlossen; somit liegt hier der maximale Störfall des Stromreglers vor. Der Strom I_{E3} muss also durch die Basis des Transistors T1 und durch R_L fließen und damit einen Spannungsunterschied von $U_d = 1A * R_L + U_{BE1} = U_a + U_{BE1}$ überwinden. Bei einem Collectorstrom von 1A beträgt U_{BE1} etwa 1,2V. Weil ein solcher Stromregler mit PNP-Transistor den Strom in dieser Größenordnung nur bis höchstens 5,7V ausreichend konstant halten kann, darf U_a höchstens 4,5V betragen, was mit einem U_z von 3,2V, einem R_2 von 1000 Ω und einem R_1 von 180 Ω erreicht werden kann.

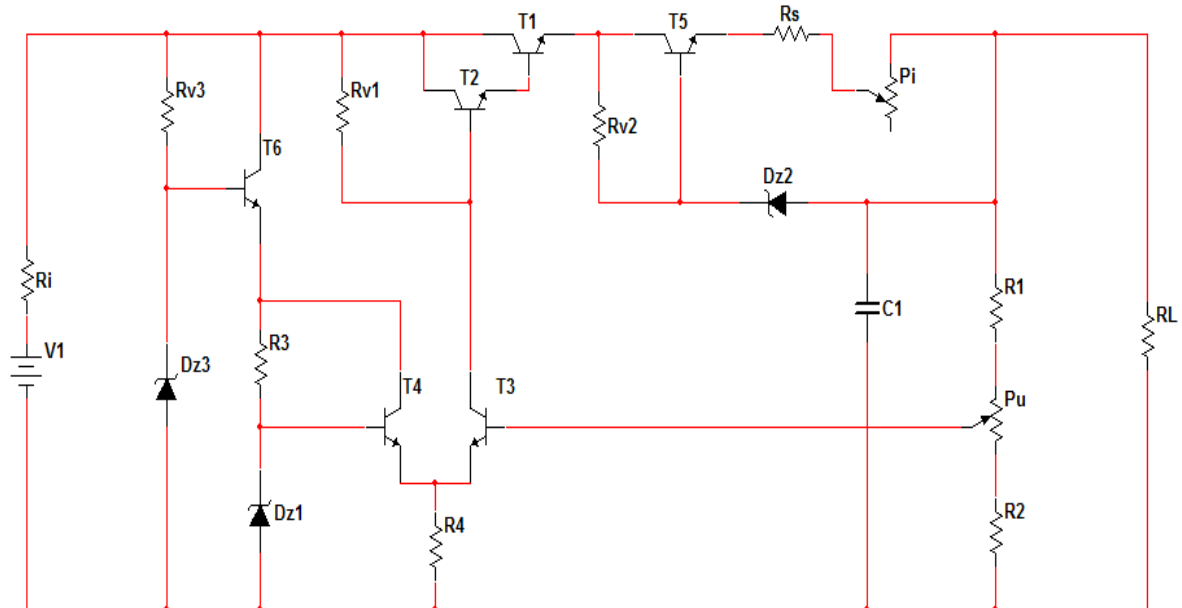
3.1.1 Messwerte 8

RL/Ω	∞	1000	100	50	20	10	5	2	1	0,1	0
UL/V	4,58	4,57	4,57	4,56	4,52	4,45	4,12	1,99	1,01	0,1	0
IL/A	0	0	0,05	0,09	0,23	0,45	0,82	0,99	1,01	1,02	1,02
IR1/mA	3,91	3,91	3,91	3,9	3,86	3,79	3,5	1,68	0,86	0,09	0
IE3/mA	12,1	12,1	12,1	12	11,9	11,8	11,6	11,9	12,1	12,3	12,3
Ri/Ω		-2	?-0,01	-0,25	-0,29	-0,32	-0,89	-12,53	-49	-91	?-600



3.2 Stromregler im Spannungsregler 2 (KombRegler2.ms10)

Größere Ausgangsspannungen und -ströme können mit folgender Schaltung erreicht werden:



Der Spannungsregler (Vorlage SpgRegler6) wird von dem Stromregler (Vorlage StrRegler3) so nicht gestört, weil T3 die Spannung von R2', also hinter dem Stromregler, regelt. Der Stromregler wird kaum gestört, weil der Strom IR1 sehr gering ist. Aus diesem Grund wurde hier die Versorgung des Spannungsteilers R3-Dz1 vor die Schalttransistoren gelegt und zusätzlich mit einem weiteren Spannungsregler (Vorlage SpgRegler1) stabilisiert.

Rv1 kann nun auf nun auf 10kΩ, R4 auf 1kΩ und R3 auf 1000Ω herabgesetzt werden.

3.2.1 Messwerte 9

Maximale Spannung & maximaler Strom:

R_L/Ω	∞	1000	100	50	20	10	5	2	1	0,1	0
U_L/V	25,4	25,4	25,3	25,3	25,1	17,7	9,68	4,06	2,06	0,21	0
I_L/A	0	0,03	0,25	0,51	1,26	1,77	1,94	2,03	2,06	2,09	2,09
R_i/Ω		?0	-0,45	?-0,1	-0,27	-14,51	-47,18	-62,44	-66,67	-61,67	?-500

Maximale Spannung & minimaler Strom:

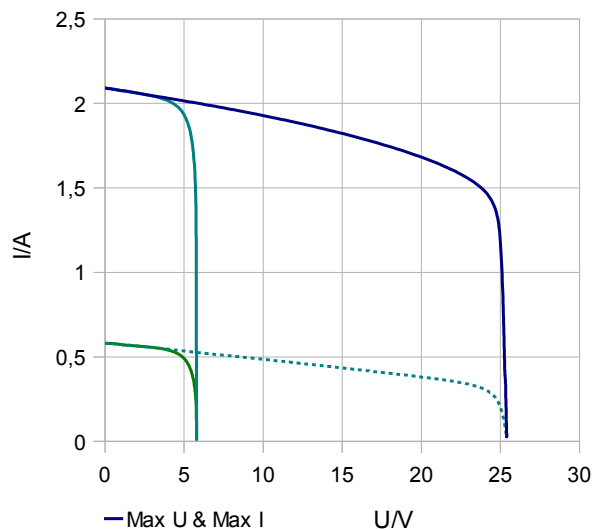
R_L/Ω	∞	1000	100	50	20	10	5	2	1	0,1	0
U_L/V	25,4	25,4	25,2	19,3	9,71	5,3	2,78	1,14	0,58	0,06	0
I_L/A	0	0,03	0,25	0,39	0,49	0,53	0,56	0,57	0,58	0,58	0,58
R_i/Ω		?0	-0,91	-42,14	-95,9	-110,3	-84	-164	-56	?-100	?-500

Minimale Spannung & maximaler Strom:

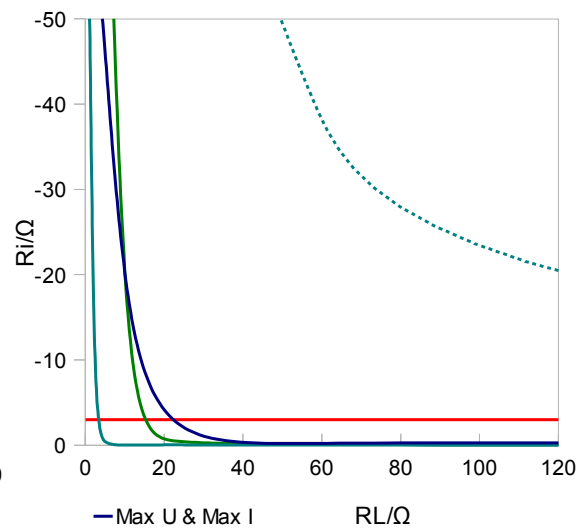
R_L/Ω	∞	1000	100	50	20	10	5	2	1	0,1	0
U_L/V	5,8	5,8	5,8	5,8	5,79	5,79	5,78	4,06	2,06	0,21	0
I_L/A	0	0,01	0,06	0,12	0,29	0,58	1,16	2,03	2,06	2,09	2,09
R_i/Ω		?0	?0	?-0,01	-0,06	?-0,02	-0,01	-1,98	-66,67	-61,67	?-500

Minimale Spannung & minimaler Strom:

R_L/Ω	∞	1000	100	50	20	10	5	2	1	0,1	0
U_L/V	5,8	5,8	5,8	5,79	5,77	5,3	2,78	1,14	0,58	0,06	0
I_L/A	0	0,01	0,06	0,12	0,29	0,53	0,56	0,57	0,58	0,58	0,58
R_i/Ω		?0	?0	-0,17	-0,18	-1,96	-84	-164	-56	?-100	?-500



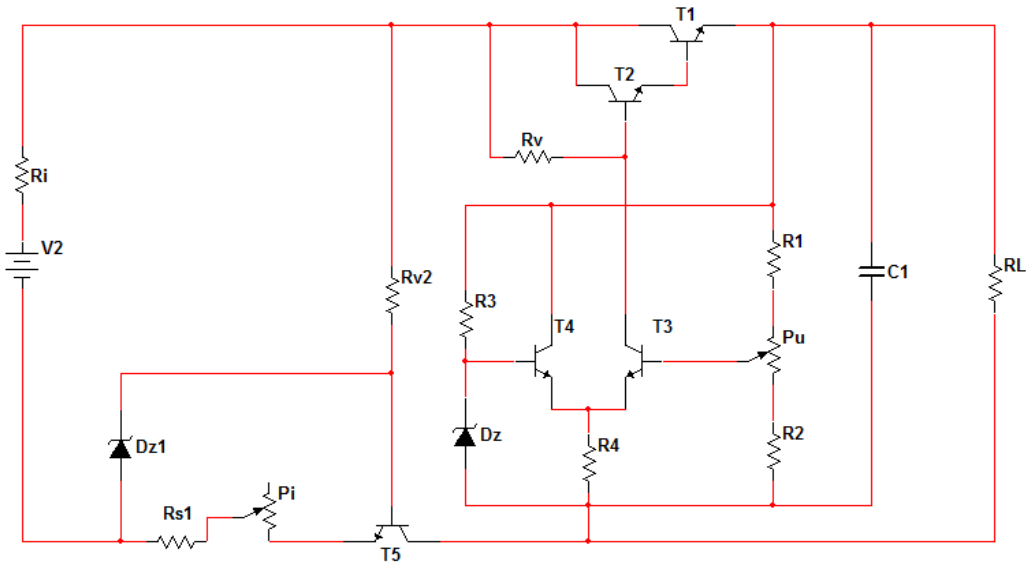
— Max U & Max I
 - - - Max U & Min I
 — Min U & Max I
 - - - Min U & Min I



— Max U & Max I
 - - - Max U & Min I
 — Min U & Max I
 - - - Min U & Min I
 — Nur Quelle

3.3 Stromregler im Spannungsregler 3 (KombRegler3.ms10)

Um die Stabilität im stromgeregelten Bereich zu verbessern, kann auch der Stromregler (Vorlage StrRegler1) vor den Spannungsregler (Vorlage SpgRegler6) geschaltet werden:



Um den Stromregler an der hier höheren Spannung betreiben zu können, muss R_{v2} auf 400Ω gesetzt werden. R_v wird auf $5k\Omega$ und R_4 auf 800Ω herabgesetzt. Der Nachteil dieser Schaltung ist, dass der Lastwiderstand nicht mehr an einem Nullpotential angeschlossen ist, jedoch ist die Stabilität im stromgeregelten Bereich jetzt besser:

3.3.1 Messwerte 10

Maximale Spannung & maximaler Strom:

R_L/Ω	∞	1000	100	50	20	10	5	2	1	0,1	0
U_L/V	25,3	25,3	25,3	25,2	25,1	19,7	9,9	3,98	1,99	0,2	0
I_L/A	0	0,03	0,25	0,51	1,26	1,97	1,98	1,99	1,99	2	2
R_i/Ω		0	0	-0,38	-0,13	-7,61	-980	-74	?-100	-179	?-200

Maximale Spannung & minimaler Strom:

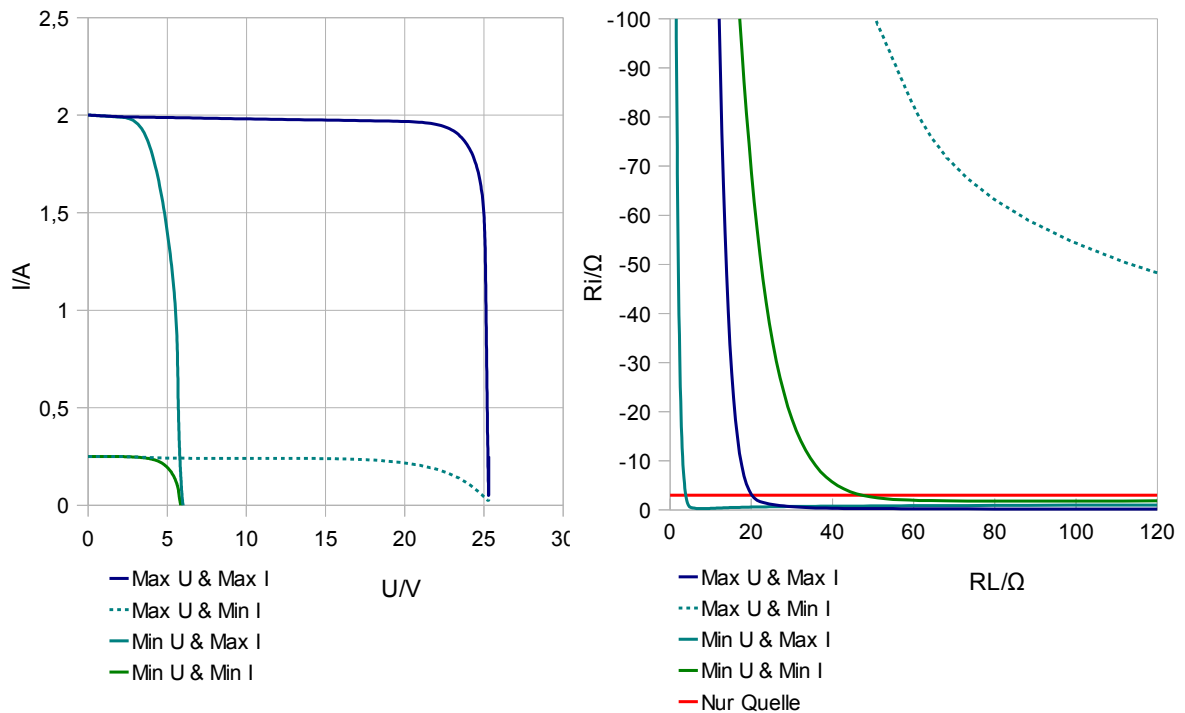
R_L/Ω	∞	1000	100	50	20	10	5	2	1	0,1	0
U_L/V	25,3	25,3	23,8	12	4,85	2,46	1,24	0,5	0,25	0,03	0
I_L/A	0	0,03	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
R_i/Ω		0	-7,14	?-100	?-160	?-180	?-185	?-190	?-200	?-210	?-220

Minimale Spannung & maximaler Strom:

R_L/Ω	∞	1000	100	50	20	10	5	2	1	0,1	0
U_L/V	6	5,97	5,92	5,87	5,76	5,67	5,61	3,95	1,99	0,2	0
I_L/A	0	0,01	0,06	0,12	0,29	0,57	1,12	1,98	1,99	2	2
R_i/Ω		-3	-1	-0,83	-0,65	-0,32	-0,12	-1,93	-196	-179	?-200

Minimale Spannung & minimaler Strom:

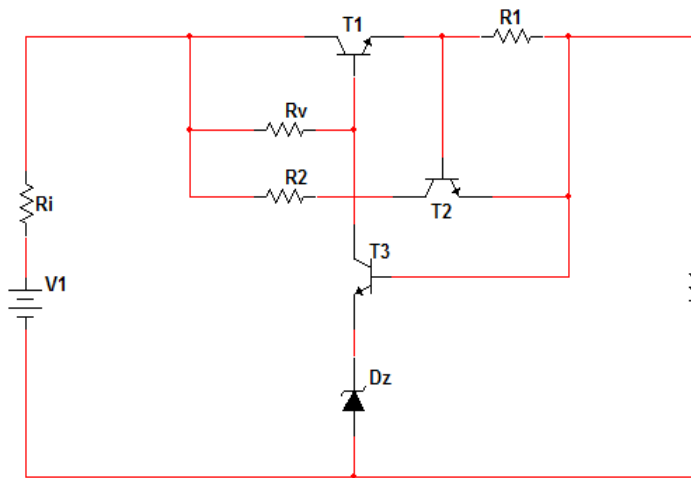
R_L/Ω	∞	1000	100	50	20	10	5	2	1	0,1	0
U_L/V	5,86	5,82	5,72	5,68	4,84	2,45	1,24	0,5	0,25	0,03	0
I_L/A	0	0,01	0,06	0,11	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
R_i/Ω		-4	-2	-0,8	-6,46	-239	?-240	?-245	?-250	?-255	?-260



4 Zusätzliche Ergänzungen

4.1 Entlastung der Schalttransistoren (Extra1.ms10)

Durch einen weiteren Transistor kann der Schalttransistor entlastet werden:



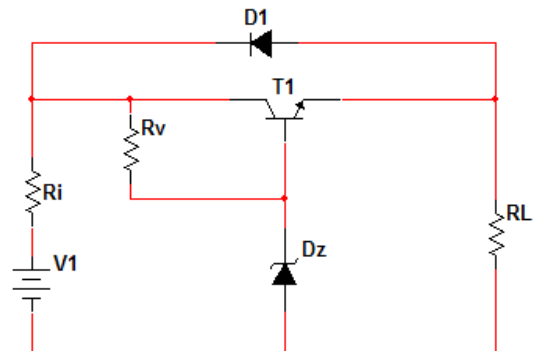
In allen Spannungsreglern mit separatem Regeltransistor können ein- oder mehrere zusätzliche Schalttransistoren eingebaut werden. Im Beispiel öffnet T2, sobald U_{R1} über 0,6V steigt. Dies geschieht dann, wenn T1 geöffnet ist und ein großer Laststrom benötigt wird. Sind I_{E1max} und I_{B2max} , sowie die Spannung U_{BE2} bei I_{B2max} bekannt, so ergibt sich $R1 = U_{BE2} / (I_{E1max} - I_{B2max})$.

Sollte durch R_i die Ausgangsspannung durch den größeren Strom sinken, so kann R_v verringert werden. R_2 regelt den Höchststrom durch T2.

Wird T2 nicht an R_2 , sondern an T1 und R_v angeschlossen, ergibt sich eine einfache Höchststrombegrenzung, deren Kennlinie jedoch nicht so scharf abknickt, wie bei den kombinierten Schaltungen.

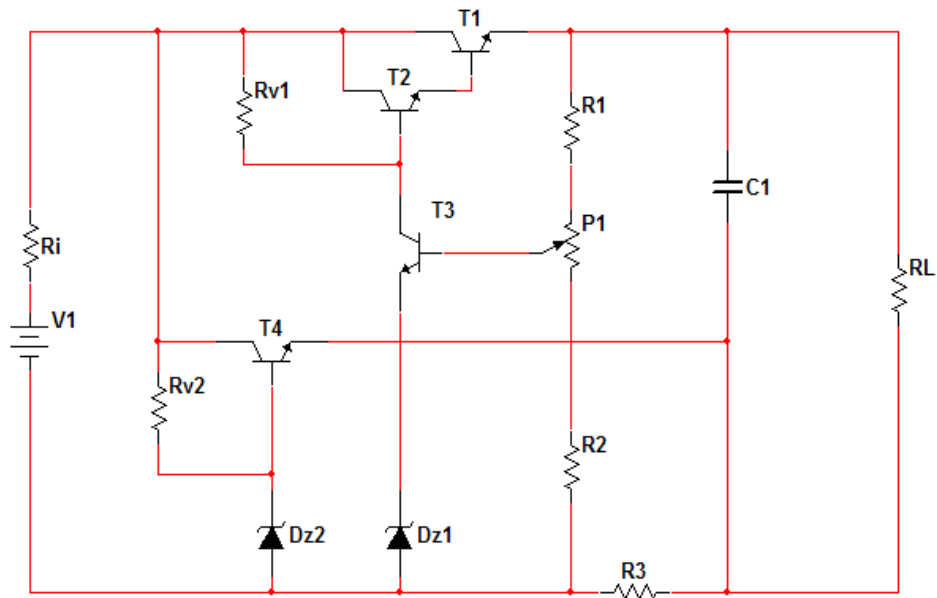
4.2 Rücklaufdiode

Sollte die Last Erzeugerverhalten aufweisen, so ist es ratsam, eine Rücklaufdiode über dem Spannungsregler anzubringen. Diese schließt die Ausgangsspannung kurz, sobald diese größer, als die Eingangsspannung wird.



4.3 Spannungseinstellbarkeit bis Null (Extra2.ms10)

Weil es aufgrund der Z-Diodenspannung normal nicht möglich ist, eine einstellbare Spannung bis 0V zu verstellen, muss hierfür mit einer anderen Spannungsquelle gegengesteuert werden:



Da der hier verwendete Spannungsregler nach Vorlage SpgRegler5 die Spannung nur bis mindestens 5,75V herunterstellen kann, wird ein weiterer, einfacher Spannungsregler eingefügt (T4), der die Spannung an R3 bei 5,75V konstant hält. Mit der Anpassung $R1 = 340\Omega$, $P1 = 30k\Omega$ und $R2 = 4k\Omega$ kann die Spannung bei dieser Schaltung zwischen 0V und 25V verändert werden.

Literaturnachweise

Die Vorlagen für die Schaltungen entstammen dem Unterrichtsmaterial *Technologie GK 1; Analogtechnik; Strom- und Spannungsstabilisierung - ÜBUNGEN*