

ET+A

Leistungselektronik und elektrische Antriebe

Kapitel 4 Gleichstromsteller

Adrian Omlin

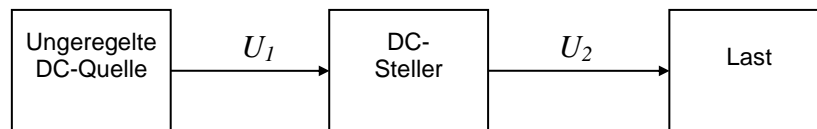
Inhaltsverzeichnis Kapitel 4

4	DER GLEICHSTROMSTELLER	3
4.1	Überblick.....	3
4.2	Der Abwärtssteller	4
4.2.1	Funktionsprinzip	4
4.2.2	Lückbetrieb	9
4.2.3	Pulsbreitenmodulation	9
4.3	Aufwärtssteller	10
4.3.1	Funktionsprinzip	10
4.4	Vierquadrantensteller	12
4.5	Gleichstromsteller mit GTO.....	13
4.6	Stromregelung mit Toleranzbandsteuerung.....	14
4.7	Schlussbemerkungen und Beispiele aus der Praxis	14

4 Der Gleichstromsteller

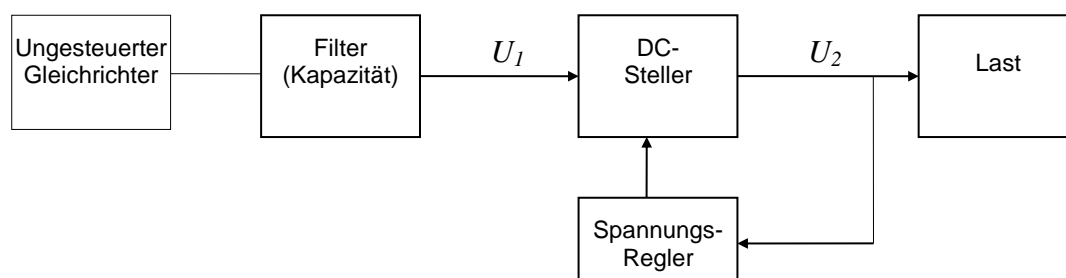
4.1 Überblick

Der Gleichstromsteller hat die Aufgabe, eine Gleichspannung U_1 in eine gegenüber U_1 höhere oder tiefere, oft geregelte Gleichspannung U_2 umzuwandeln. Dazu werden Halbleiter verwendet. Diese werden als Schalter betrieben, da sie so möglichst verlustfrei arbeiten.



Gleichstromsteller sind weit verbreitet als Netzgeräte, Stromversorgungen oder zur Speisung von Gleichstrommotoren.

Die Eingangsspannung U_1 wird oft mit einem ungesteuerten Gleichrichter erzeugt. Sie ist somit unregelt und folgt den Netzspannungsschwankungen. Die Ausgangsspannung U_2 kann durch einen Regelkreis auf den gewünschten Wert eingestellt werden.



Folgende Gleichstromsteller sind hauptsächlich im Einsatz:

Tiefsetzsteller oder Abwärtssteller	step-down (buck) converter	$U_2 < U_1$
Hochsetzsteller oder Aufwärtssteller	step-up (boost) converter	$U_2 > U_1$
Hochsetz-Tiefsetz-Steller	buck-boost converter	$U_2 < U_1$ oder $U_2 > U_1$
Vierquadrantensteller	full bridge converter	U_1 und U_2 können unabhängig vom Strom je positiv oder negativ sein
Durchfluss- und Sperrwandler	DC-Wandler mit integriertem Transformator	

4.2 Der Abwärtssteller

4.2.1 Funktionsprinzip

Ist die Last ein idealer Widerstand, besteht der Abwärtssteller eigentlich nur aus einem Halbleiterschalter.

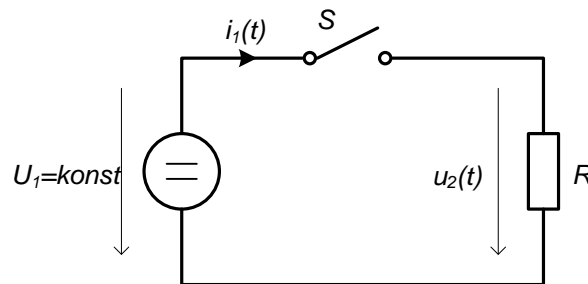


Abb. 4-1: Grundsaltung des Abwärtsstellers.

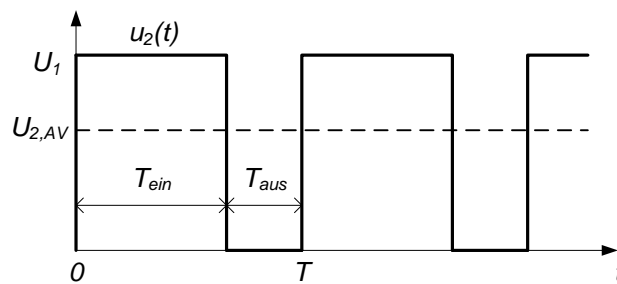


Abb. 4-2: Ausgangsspannung der Grundsaltung.

Wird der Schalter S regelmässig ein- und ausgeschaltet, lässt sich über die Breite der Pulse der Mittelwert (AV = average) der Ausgangsspannung U_2 einstellen:

$$U_{2,AV} = \frac{T_{ein}}{T} U_1 = \frac{T - T_{aus}}{T} U_1 = a U_1 \quad a = \frac{T_{ein}}{T}$$

Da eine reale Last praktisch immer einen induktiven Anteil enthält, muss der Laststrom auch bei geöffnetem Schalter ($S = 0$) fließen können. Dafür wird eine *Freilaufdiode* eingesetzt.

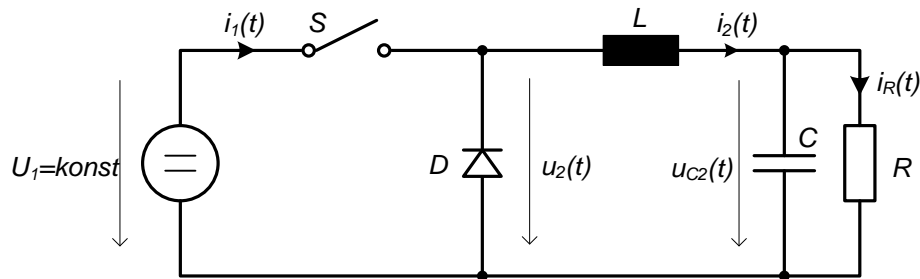


Abb. 4-3: Abwärtssteller.

In der Regel wird eine hohe Schaltfrequenz verwendet. Dadurch ist die Zeitkonstante der Last deutlich grösser als die Periodendauer T .

$$\frac{L}{R} \gg T$$

Unter der Annahme, dass der Steller verlustfrei arbeitet, gilt:

$$P_1 = U_1 I_{1,AV}$$

$$P_2 = U_{2,AV} I_{2,AV} = a U_1 I_{2,AV}$$

Und damit:

$$I_{1,AV} = a I_{2,AV}$$

Parallel zum Lastwiderstand R wird oft eine Kapazität C eingefügt, welche die Lastspannung zusätzlich glättet. Dabei ist darauf zu achten, dass keine unerwünschten Resonanzen entstehen. Deshalb muss die Resonanzfrequenz des Schwingkreises aus L und C deutlich tiefer sein als die Taktfrequenz.

Da die Lastinduktivität L endlich ist, ist der Strom $i_2(t)$ nicht konstant. Im eingeschalteten Zustand steigt der Strom i_2 an mit der Steilheit

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{U_1 - U_{2,AV}}{L}$$

Die Induktivität nimmt dabei Energie auf, welche sie bei offenem Schalter der Last weitergibt. Dabei nimmt der Strom i_2 ab mit der Steilheit

$$\frac{di_2}{dt} = -\frac{U_{2,AV}}{L}$$

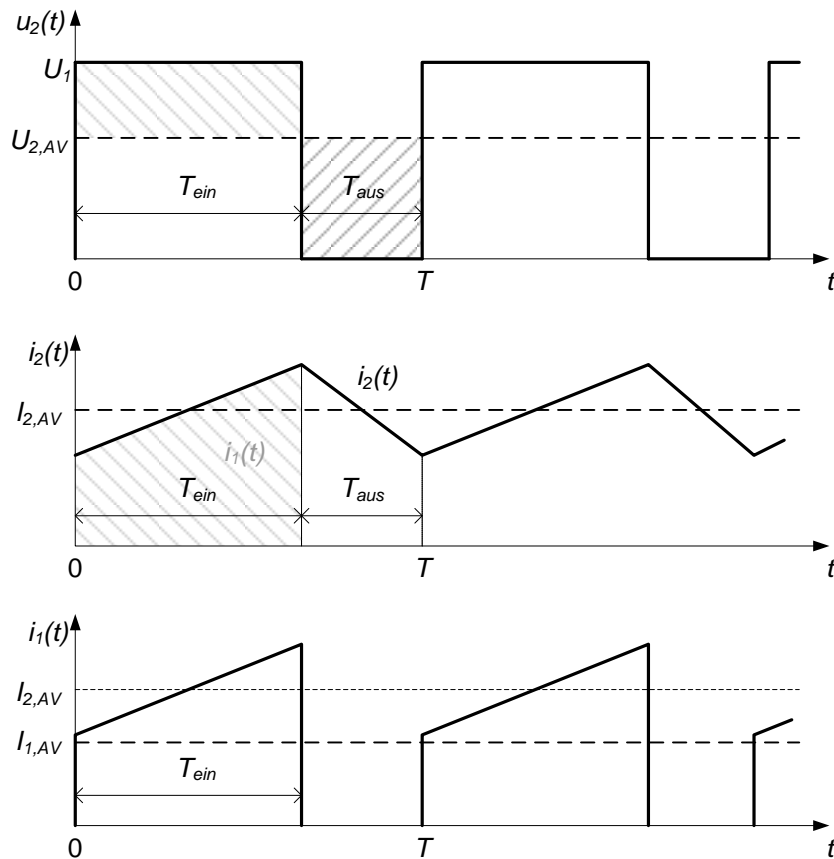
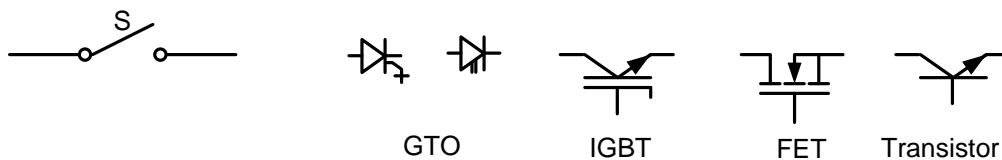


Abb. 4-4: Abwärtssteller bei nicht lückendem Betrieb.

Oft wird der Abwärtssteller auch als Tiefsetzsteller oder Buck Converter bezeichnet.

Beim *realen* Steller wird statt des Schalters S ein Leistungshalbleiter (z.B. Transistor, FET, GTO, IGBT) eingesetzt.



Meist weist die Last einen erheblichen induktiven Anteil und zum Teil eine interne Gegenspannung auf. Auf einen Glättungskondensator kann dann verzichtet werden. Die Schaltung sieht somit wie folgt aus:

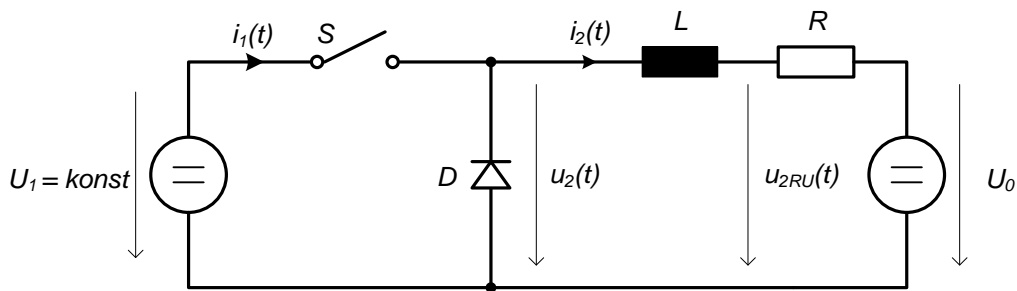


Abb. 4-5: Abwärtssteller mit Standardgleichstromlast.

Die oben gezeigte Ersatzschaltung bestehend aus L , R und einer Gegenspannungsquelle gilt für viele Anwendungen (Gleichstrommaschine, Batterie mit Zuleitung, Elektrolysezelle etc.). Deshalb wird sie als Standardgleichstromlast bezeichnet.

Da der Mittelwert der Spannung über L im stationären Betrieb null sein muss, entspricht der Mittelwert der Ausgangsspannung der Spannung über der Spannungsquelle und dem Lastwiderstand.

$$U_{2,AV} = R \cdot I_{2,AV} + U_0 \quad \text{bzw.} \quad I_{2,AV} = \frac{U_{2,AV} - U_0}{R}$$

Ist die Induktivität L gross, wird der Strom $i_2(t)$ gut geglättet. Die Spannung über dem Widerstand R ist somit auch gut geglättet. So fallen auch hier wie bei der C-Glättung über der Induktivität praktisch rechteckförmige Spannungszeitflächen ab, und der Laststrom steigt und fällt wie im Beispiel mit der C-Glättung praktisch linear.

Ist die Induktivität nicht sehr gross bzw. die Taktfrequenz nicht deutlich kleiner als die Zeitkonstante L/R , setzt sich der Stromverlauf wie unten angedeutet aus Ausschnitten von e-Funktionen zusammen.

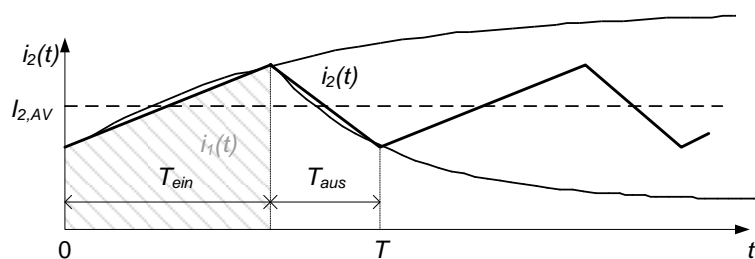


Abb. 4-6: Strom als e-Funktion bei tiefer Taktfrequenz.

Wird die Quelle mit einem Glättungskondensator ausgestattet, wird dieser mit unten dargestelltem Strom belastet.

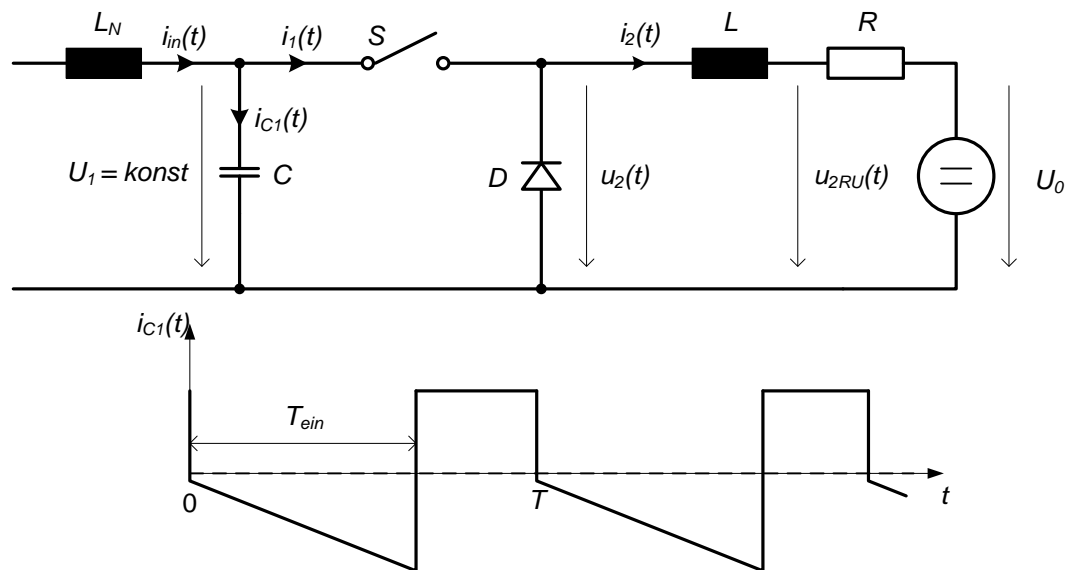


Abb. 4-7: Strom im Glättungskondensator der Quelle.

Betrachtet wurde bis jetzt nur der stationäre Betrieb. Untenstehendes Bild soll veranschaulichen, wie sich beispielsweise bei einer Erhöhung des Aussteuerungsgrades ein neuer stabiler Arbeitspunkt einstellt:

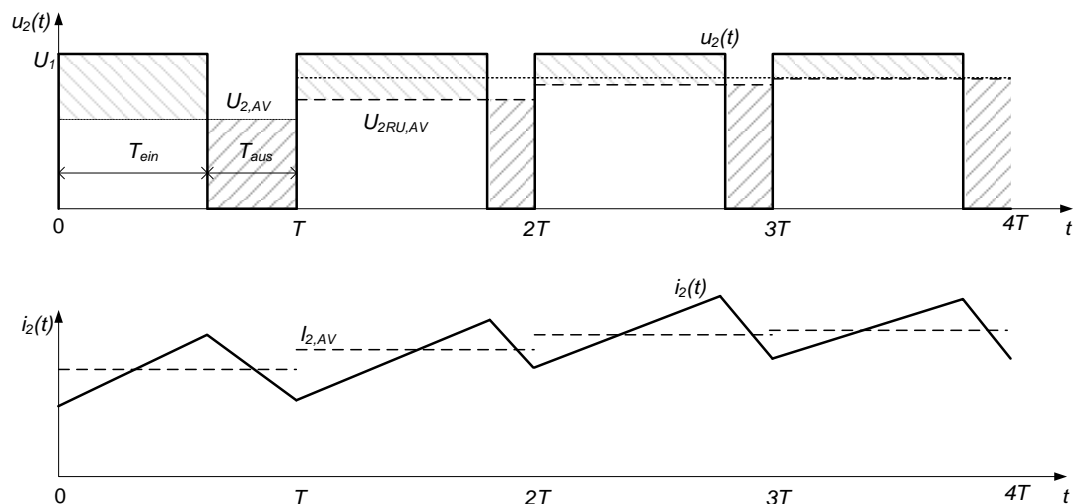


Abb. 4-8: Transienter Übergang beim Verändern des Aussteuerungsgrades.

Beim Erhöhen des Aussteuerungsgrades ist die positive Spannungszeitfläche über L temporär grösser als die negative. Das führt zu einem Anstieg des Strommittelwertes, bis dieser so gross ist, dass der Spannungsabfall über R zusammen mit U_0 dem neuen Mittelwert $U_{2,AV}$ der Ausgangsspannung entspricht. Ist das erreicht, sind wiederum die positive und die negative Spannungszeitfläche über L gleich gross und der Arbeitspunkt ist stationär.

4.2.2 Lückbetrieb

Von Lückbetrieb wird gesprochen, wenn $i_2(t)$ periodisch null wird. Das ist der Fall, wenn der Strommittelwert kleiner ist als der halbe Stromrippel. In diesem Fall gelten die bisherigen Annahmen nicht mehr vollumfänglich. Der Mittelwert $U_{2,AV}$ der Spannung u_2 ist abhängig vom Laststrom und höher als im nicht lückenden Betrieb, da während der Zeit, in welcher der Strom null ist, u_2 nicht null ist, sondern dem Mittelwert $U_{2,AV}$ entspricht.

Die Ausgangsspannung wird bei Vorhandensein einer genügend grossen Kapazität parallel zum Lastwiderstand höher und abhängig vom Laststrom:

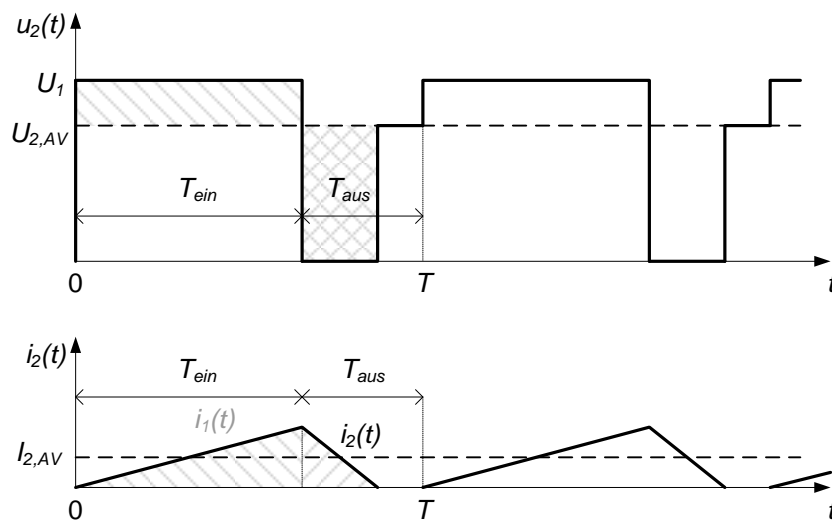


Abb. 4-9: Abwärtssteller bei lückendem Betrieb.

4.2.3 Pulsbreitenmodulation

Beim wichtigsten Steuerverfahren, der so genannten Pulsbreitenmodulation [Pulse-Width Modulation (PWM)] wird das Verhältnis von T_{ein} zu T bei konstanter Taktfrequenz f variiert. Die Taktfrequenz liegt dabei meist in der Grössenordnung kHz.

Das Steuersignal für den Schalter S erhält man durch den Vergleich des Sollwerts $U_{2,AV,soll}$ mit einem periodischen Signal $u_{st}(t)$ (z.B. Sägezahn oder Dreieck) mit konstanter Frequenz f und Amplitude \hat{U}_{st} :

$$f = \frac{1}{T}; \quad \hat{U}_{st} = U_1$$

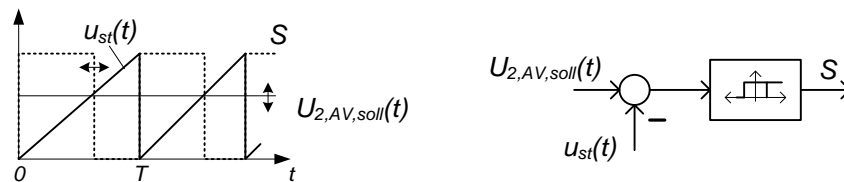


Abb. 4-10: Mögliche Realisierung der Pulsweitenmodulation.

Nebst der PWM existiert die weniger verbreitete Pulsfolgesteuerung:

$$T_{ein} = konst.; f = variabel$$

Zudem können die Schaltimpulse direkt von einem Stromregler erzeugt werden. Dieses Verfahren ist in Kapitel 4.6 beschrieben.

4.3 Aufwärtssteller

4.3.1 Funktionsprinzip

Der Aufwärtssteller erzeugt eine Ausgangsspannung $U_{2,AV}$, welche höher ist als die Eingangsspannung U_1 . Oft wird der Aufwärtssteller auch als Hochsetzsteller oder Boost Converter bezeichnet.

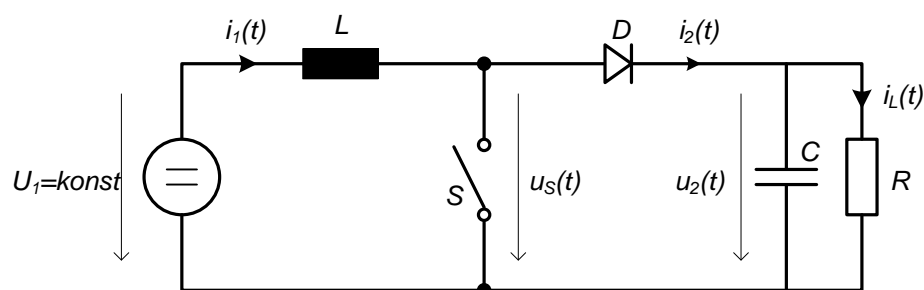


Abb. 4-11: Hochsetzsteller.

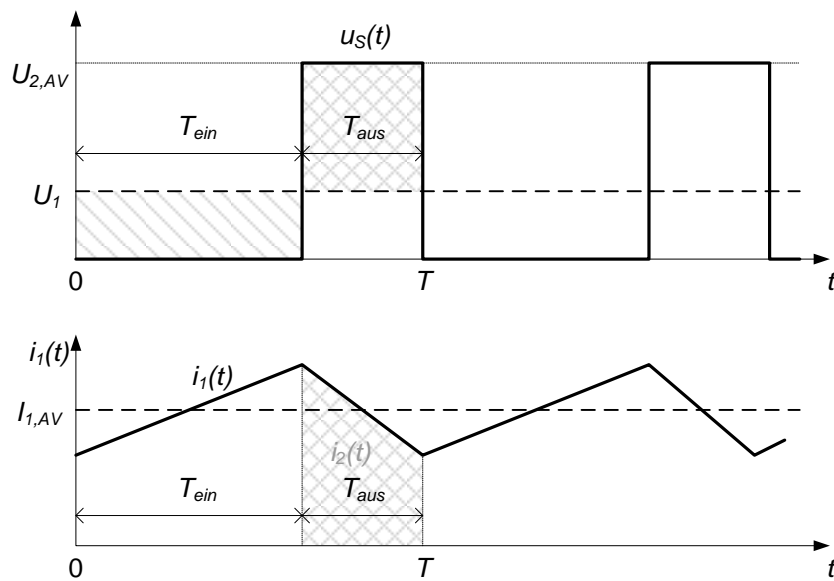


Abb. 4-12: Hochsetzsteller bei nicht lückendem Betrieb.

Im stationären Zustand ist der Mittelwert der Spannung über der Induktivität L null:

$$\frac{1}{T} U_{L,AV} dt = \frac{1}{T} \int u_L dt = \frac{1}{T} U_1 t_{ein} + \frac{1}{T} (U_1 - U_{2,AV}) t_{aus} = U_1 - (1-a) U_{2,AV} = 0$$

Umrechnung ergibt:

$$U_{2,AV} = U_1 \frac{1}{1-a}$$

Mit der Annahme verlustfreien Schaltens folgt auch:

$$I_{2,AV} = I_{1,AV} (1-a)$$

Geht der Strom $i_l(t)$ periodisch auf null, entsteht wiederum Lückbetrieb.

4.4 Vierquadrantensteller

Der Vierquadrantensteller (Full Bridge DC-DC Converter) ist eigentlich ein einphasiger, selbstgeführter Wechselrichter. Der Wechselrichter wird in einem späteren Kapitel ausführlich behandelt. In diesem Kapitel wird nur kurz auf seinen Einsatz als DC-Steller eingegangen.

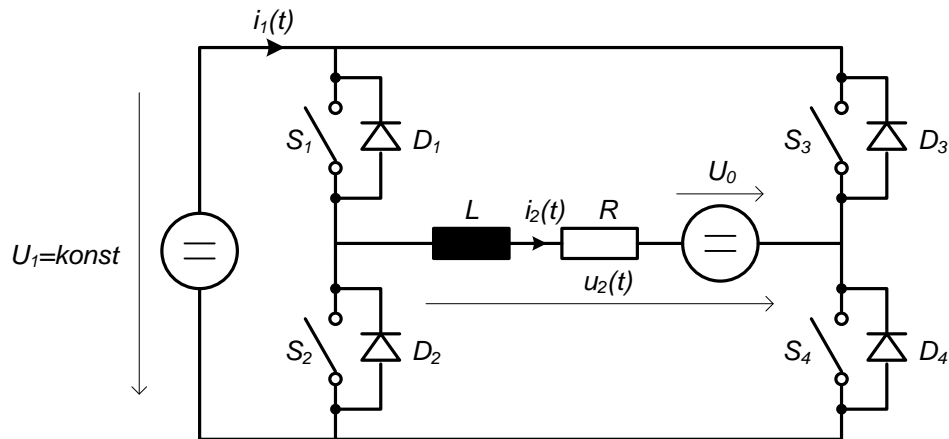


Abb. 4-13: Vierquadrantensteller mit RL-Last.

Diese Schaltung kann als Abwärtssteller arbeiten, wenn beispielsweise Schalter S_4 geschlossen bleibt und Schalter S_1 getaktet wird. Diode D_2 arbeitet dann als Freilaufdiode. Schalter S_3 bleibt offen.

Soll das Vorzeichen von $U_{2,AV}$ und $I_{2,AV}$ geändert werden, kann S_2 geschlossen werden. S_3 wird getaktet und D_4 arbeitet als Freilaufdiode. Schalter S_1 bleibt offen. Die Leistung fließt in beiden Fällen von der Quelle U_1 zur Last.

Diese Schaltung kann mit aktiver Last, d.h. wenn U_0 nicht null ist, auch als Aufwärtssteller betrieben werden. R_2 sollte dabei natürlich möglichst klein sein. Wird nun beispielsweise der Schalter S_4 dauernd geschlossen, arbeitet bei getaktetem Schalter S_2 die Schaltung mit Freilaufdiode D_1 als Aufwärtssteller und Leistung fließt pulsförmig zur „Last“ U_1 . Der Schalter S_3 bleibt dabei offen.

Soll das Vorzeichen von $U_{2,AV}$ und $I_{2,AV}$ geändert werden (auch U_0 muss dabei das Vorzeichen ändern), wird S_2 dauernd geschlossen, S_4 wird getaktet und die Diode D_3 übernimmt die Freilauffunktion. Der Schalter S_1 bleibt dabei offen.

Der Steller kann somit als Vierquadranten-Abwärtssteller bezeichnet werden, da $U_{2,AV}$ kleiner als U_1 ist, und dabei wie auch der Strom $I_{2,AV}$ positiv oder negativ sein kann. Eine Gleichstrommaschine kann so in beiden Drehrichtungen sowohl als Motor als auch als Generator betrieben werden.

4.5 Gleichstromsteller mit GTO

Werden statt idealer Schalter reale Halbleiter eingesetzt, muss dem Schutz dieser Halbleiter Beachtung geschenkt werden. Hier soll als Beispiel die Ein- und Ausschaltentlastung untersucht werden, wenn ein GTO (Gate Turn Off Thyristor) eingesetzt wird.

Eine wichtige Funktion erfüllt die Ansteuerung. Damit der Thyristor möglichst schnell ein- und ausschaltet, müssen Zünd- und Löschimpulse von ausreichender Stärke und Steilheit angelegt werden. Zusätzlich müssen Strom- und Spannungssteilheit durch so genannte Entlastungsnetzwerke begrenzt werden. Das folgende Bild zeigt die Schaltung eines GTO-Gleichstromstellers mit Einschalt- und Ausschaltentlastungsnetzwerk.

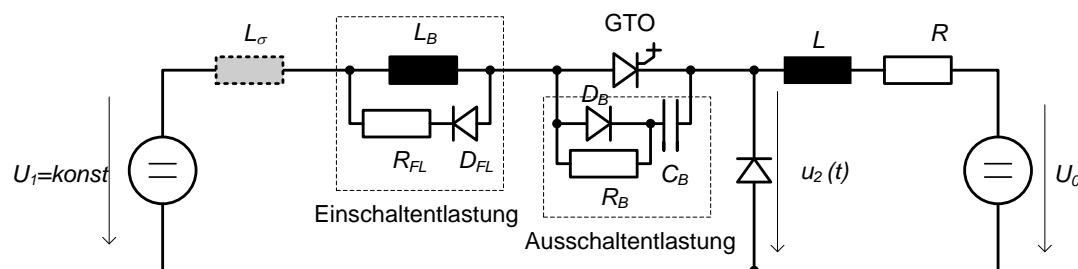


Abb. 4-14 Gleichstromsteller mit GTO.

Begrenzung der Stromsteilheit beim Einschalten

Wenn die ohnehin vorhandene Leitungsinduktivität L_σ nicht ausreicht, muss eine zusätzliche Induktivität L_B eingefügt werden, um die Steilheit des Einschaltstromes zu begrenzen. Damit die Induktivität L_B nicht zu Problemen beim Abschalten führt, muss sie mit einem Freilaufkreis (D_{FL} , R_{FL}) versehen werden. L_B , D_{FL} und R_{FL} stellen das Einschaltentlastungsnetzwerk dar.

Begrenzung der Spannungssteilheit beim Abschalten

Die Begrenzung der Spannungssteilheit beim Abschaltvorgang hat den Zweck, die Abschaltverlustleistung niedrig zu halten. Ausserdem muss ein ungewolltes Wiedereinschalten vermieden werden. Dies kann mit Hilfe des Ausschaltentlastungsnetzwerkes (C_B , D_B , R_B) erreicht werden. Zentrales Element ist der Kondensator C_B , der den Spannungsanstieg begrenzt. Nach dem Abschaltvorgang ist der Kondensator auf die Quellenspannung aufgeladen. Der Widerstand R_B begrenzt den Entladestrom von C_B nach dem Zünden des GTOs. Mit D_B wird der Widerstand beim Abschaltvorgang überbrückt. Wichtig ist eine schnell schaltende Diode, ein induktivitätsarmer Kondensator und geringe Leitungsinduktivitäten (Netzwerk so nahe wie möglich beim GTO anbringen). C_B sollte aber nicht grösser als unbedingt notwendig sein, da sonst der Schaltvorgang unnötig verlangsamt wird. Oft wird für die Ausschaltentlastung der englische Ausdruck "Snubber" verwendet. Neben der Begrenzung des Spannungsanstiegs werden auch für den Halbleiter schädliche Überspannungen verkleinert.

4.6 Stromregelung mit Toleranzbandsteuerung

Nebst der in Kapitel 4.2.3 vorgestellten Pulsweitenmodulation können die Schaltimpulse auch mit anderen Verfahren, beispielsweise mit der Toleranzbandsteuerung, generiert werden. Bei der Toleranzbandsteuerung kann auf die Pulsdauer- oder Pulsfrequenzsteuerung verzichtet werden. Der Schalter beim Abwärtssteller wird dabei geschlossen, wenn der Strom nach unten aus dem Toleranzband läuft und geöffnet, wenn der Strom die obere Grenze des Toleranzbandes überschreitet. Oft werden diese Regler auch als Hystereseregler bezeichnet.

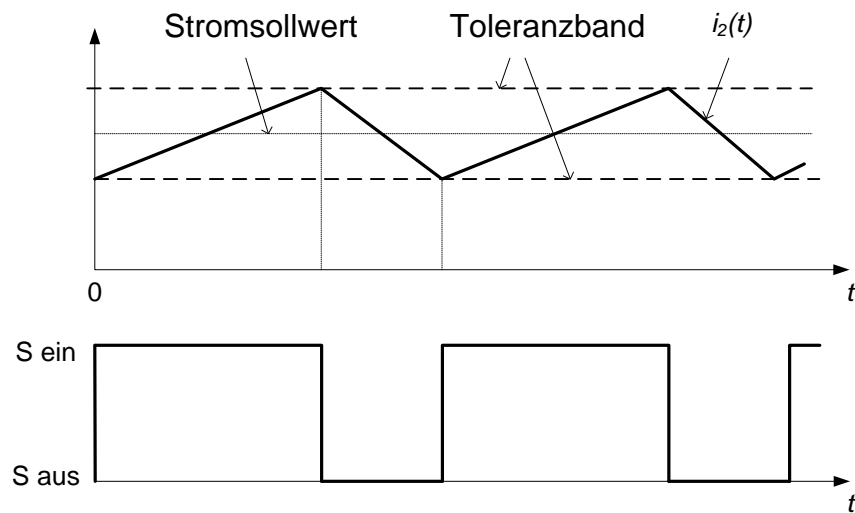


Abb. 4-15: Stromverlauf und Schaltsignale beim Toleranzbandregler.

4.7 Schlussbemerkungen und Beispiele aus der Praxis

Problematisch bei allen Gleichstromstellern sind Streuinduktivitäten, die zu Überspannungen und damit zur Zerstörung der Halbleiter führen können. Sie erfordern Gegenmassnahmen ("Snubber"), wie anhand des GTOs gezeigt wurde.

Das sehr schnelle Schaltvermögen moderner Halbleiter (z.B. IGBT, Insulated Gate Bipolar Transistor) stellt grosse Anforderungen an die Freilaufdioden, die ebenso schnell sein müssen.

Hautanwendungen von Gleichstromstellern:

- Netzgeräte
- Gleichstromtraktion (Tram, Gleichstrombahnen)
- Batteriefahrzeuge
- 4-Quadrantensteller als Wechselrichter in Umrichtern
- DC-Spannungsanpassung (z.B. Fotovoltaik)

Beispiele aus der Praxis

Moderne integrierte Abwärts-Schaltregler (buck converter) vereinfachen den Entwurf von Stromversorgungen und haben durch die Verwendung von SMD - Bauelementen sehr kleine Abmessungen. Sie werden häufig bei mobilen Anlagen eingesetzt (z.B. digitale Kameras, Fahrzeug-GPS-Empfänger, Audioelektronik) und haben hohe Taktfrequenzen.

Ein konkretes Produkt, der 5V-Buck-Wandler LT1374-SYNC von Linear Technology, erzeugt eine konstante Ausgangsspannung von $U_2 = 5 \text{ V}$ bei Eingangsspannungen U_1 von 6 V bis 25 V und einer konstanten Taktfrequenz von 500 kHz, wodurch Störungen von der in Empfängern oft verwendeten Zwischenfrequenzen bei 455 kHz ferngehalten werden. Die Glättungsinduktivität muss bei 4 A lediglich 20 μH aufweisen. Das Bauelement verfügt zudem über eine komplette Kurzschlussstrombegrenzung in jedem Zyklus sowie eine Übertemperaturregelung. Der Wirkungsgrad beträgt bei 1 A ca. 90%, bei 4 A ca. 88%.

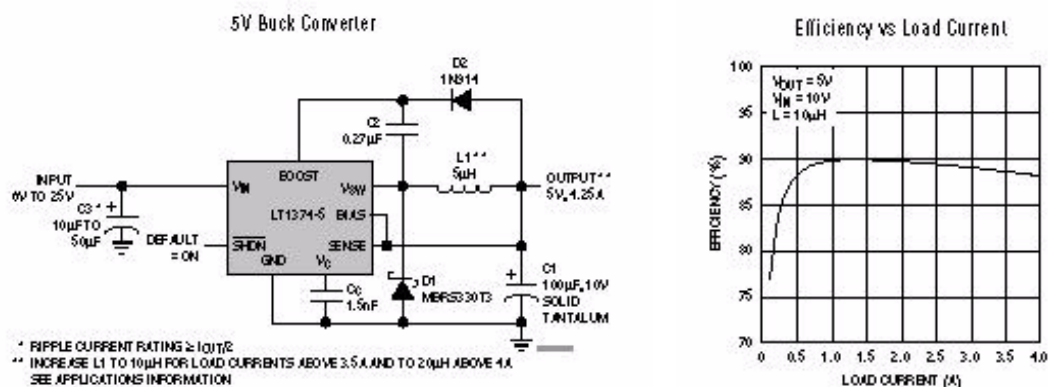


Abb. 4-16: 5V-Buck-Wandler LT1374-SYNC von Linear Technology

Die VBZ haben seit 1976 Chopperfahrzeuge im Einsatz. Als Halbleiter wurden anfänglich Thyristoren mit Zwangskommütierung eingesetzt, später GTOs.



Abb. 4-17: Tram 2000

Moderne Antriebe ab DC-Netz setzen wie bei AC-Speisung Frequenzumrichter und Asynchronmotoren ein (z.B. COBRA oder COMBINO). Diese Antriebe werden später besprochen.