

Laborübung, H-Brücke für DC-Motor

1 Motoransteuerung mit einer H-Brücke

Ziel. In dieser Laborübung kommt ein Gleichstrommotor mit mechanischem Kommutator zum Einsatz, den wir abkürzend als DC-Motor bezeichnen. Seine Leerlauf-Drehzahl ist in etwa proportional zur angelegten Gleichspannung. Eine präzisere Beschreibung des Verhaltens eines DC-Motors werden sie im Modul EL4 kennenlernen. Wird das Vorzeichen der Spannung umgedreht, so ändert sich auch die Drehrichtung des Motors. Das Ziel dieses Praktikums ist es, eine elektronische Ansteuerschaltung zu entwickeln, die sowohl die Drehzahl als auch die Drehrichtung eines DC-Motors steuern kann.

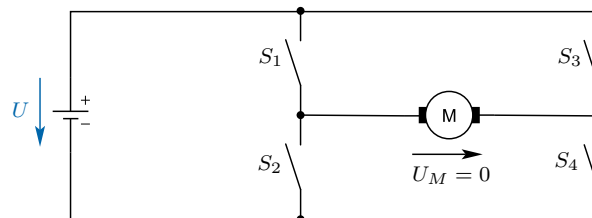
Von einer solchen Schaltung wünscht man sich an erster Stelle, dass sie selber einen möglichst kleinen Teil der elektrischen Leistung verbraucht, bzw. einen hohen Wirkungsgrad hat. Dadurch wird die Kühlung vereinfacht und es wird möglich, die Schaltung auf engem Raum unterzubringen.

1.1 Prinzipschaltung

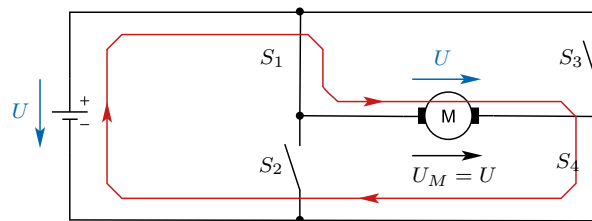
Eine geringe Verlustleistung $P = U \cdot I$ erreicht man, indem die beteiligten elektronischen Schaltelemente immer entweder ganz ein- ($U = 0$) oder ausgeschaltet ($I = 0$) sind. Das heisst zum Beispiel, dass die Spannung am Motor mit Hilfe einer PWM (Pulsweitenmodulation) eingestellt wird. Das entsprechende Schaltungsprinzip, welches es auch erlaubt das Vorzeichen der Motorspannung zu wählen, ist in Abb. 1a dargestellt.

Funktionsweise. Die Spannung U_M am Motor ist gleich 0 wenn die Schalter S_1 bis S_4 wie in Abb. 1a dargestellt ausgeschaltet sind. Schaltet man S_1 und S_4 ein, so ist U_M gleich der Versorgungsspannung U , wie aus Abb. 1b ersichtlich ist. Wir gehen davon aus, dass sich der Motor dann nach rechts dreht. Die gleiche Spannung mit negativem Vorzeichen also $U_M = -U$

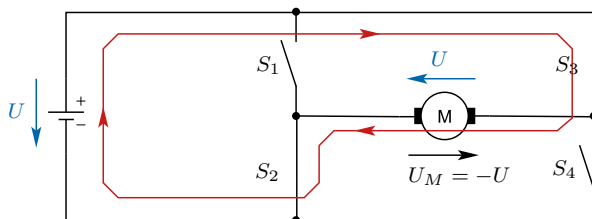
liegt an, wenn die Schalter S_2 und S_3 geschlossen sind. Siehe Abb. 1c. In diesem Fall dreht der Motor nach links. Die H-Brücke hat ihren Namen von dem Aussehen des Schaltbildes. Die vier Schaltersymbole bilden die vertikalen Linien und das Symbol für den Motor die horizontale Brücke dazwischen. *Hinweis:* Es muss natürlich darauf geachtet werden, dass niemals die Transistoren T_1 und T_2 bzw. die Transistoren T_3 und T_4 gleichzeitig eingeschaltet sind.



(a) Aus



(b) Rechtslauf



(c) Linkslauf

Abbildung 1: Prinzip der H-Brücke.

Mit einer solchen Schaltung kann ein DC-Motor aus- und eingeschaltet werden und die Richtung gewählt werden. Wie aber lässt sich die Höhe der Spannung und damit die Drehzahl einstellen? Der Motor besitzt eine mechanische Trägheit. Diese wirkt sich so aus, dass die momentane Drehzahl nicht durch die momentane Spannung $u_M(t)$ sondern durch deren Mittelwert \bar{u}_M bestimmt wird, wobei der Mittelwert der Spannung je nach Grösse des Motors über einige 10 ms gebildet wird.

Drehzahlsteuerung durch PWM. Wir können also das Prinzip der PWM nutzen, um den Mittelwert der Spannung einzustellen. Dazu werden zuerst die beiden Schalter S_1 und S_4 eingeschaltet. Etwas später, z.B. nach zehn Mikrosekunden werden sie wieder ausgeschaltet und

dann die Schalter S_2 und S_3 eingeschaltet und wiederum nach wenigen zehn Mikrosekunden ausgeschaltet. Dieser Ablauf wird laufend wiederholt. Abbildung. 2 zeigt den resultierenden Spannungsverlauf $u_M(t)$ und die mittlere Spannung \bar{u}_M für zwei verschiedene Tastverhältnisse

$$p = \frac{T_r}{T_l + T_r}. \quad (1)$$

Die Bedeutung der Variablennamen ist aus Abb.2a ersichtlich. Das Tastverhältnis p bestimmt

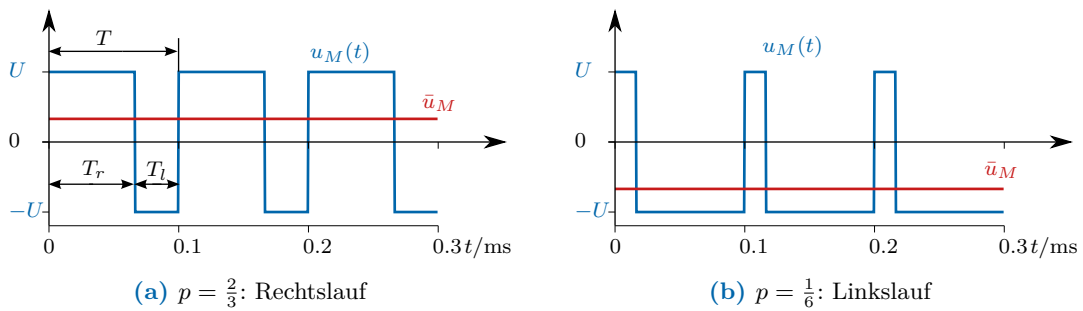


Abbildung 2: Pulsweitenmodulation zur Steuerung der mittleren Motorspannung \bar{u}_M und der Drehrichtung.

also die mittlere Motorspannung. Anhand von Abb.2 und (1) kann man sich den folgenden Zusammenhang überlegen:

$$\begin{aligned} \bar{u}_M &= \frac{T_r U - T_l U}{T} \\ &= U(2p - 1) \end{aligned} \quad (2)$$

Die Periodendauer T des pulswidenmodulierten Rechtecksignals ist gleich dem Kehrwert der sogenannten PWM-Frequenz:

$$f := \frac{1}{T} \quad (3)$$

Interpretation. Die beiden extremsten Tastverhältnisse $p = 1$ bzw. $p = 0$ bewirken also $\bar{u}_M = U$ und damit Rechtsdrehung mit höchster Drehzahl bzw. $\bar{u}_M = -U$ und damit Linksdrehung mit höchster Drehzahl. Das Tastverhältnis $p = 0.5$ bewirkt $\bar{u}_M = 0$ V und damit den Stillstand des Motors.

1.2 Realisierung mit MOSFETs

In der Praxis werden die Schalter meist mit N-Kanal MOSFETs vom Anreicherungstyp realisiert. Die entsprechende Prinzipschaltung ist in Abb. 3 dargestellt. Im Unterschied zu den

Schaltern in Abb. 1 sind parallel zu den Drain-Source Strecken der Transistoren zusätzliche Dioden antiparallel geschaltet. Diese sogenannten Freilaufdioden ermöglichen es, dass der Strom durch die Induktivität des Motors auch während und nach dem Umschaltvorgang weiterfließen kann. Dadurch wird verhindert, dass hohe Induktionsspannungen entstehen, welche die Transistoren zerstören könnten.

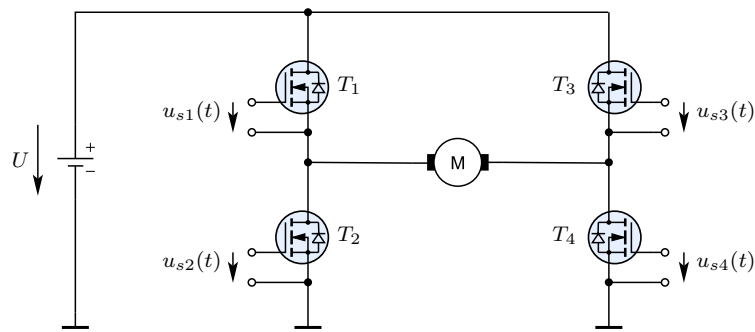


Abbildung 3: H-Brücke mit MOSFET Transistoren.

Filterschaltung. Die Spannungen an den Anschlussleitungen des Motors ändern sich während des Ein- und Ausschaltens der Transistoren sehr schnell. Dadurch können in benachbarten Leitungen vor allem durch kapazitive Kopplung Störspannungen entstehen. Um diesen Effekt zu reduzieren werden zwischen den beiden Ausgängen der H-Brücke und den Motoranschlüssen Tiefpassfilter eingebaut die aus je einer Spule und einem Kondensator bestehen, siehe Abb. 4. Diese Tiefpassfilter unterdrücken den Wechselanteil der beiden Ausgangsspannungen und

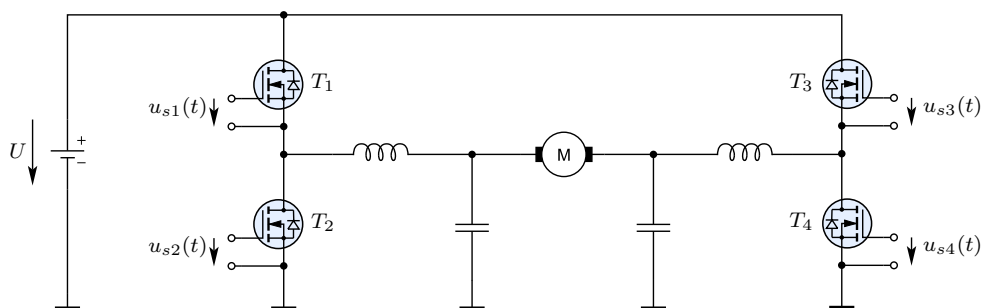


Abbildung 4: H-Brücke mit Filterschaltung zur Reduktion elektromagnetischer Emissionen durch die Motorzuleitungen.

lassen hauptsächlich deren Mittelwert passieren. Dadurch wird erreicht, dass die Zuleitungen zum Motor nicht mehr so schnelle Spannungsschwankungen führen müssen. Was wiederum weniger Störungen oder anders ausgedrückt, weniger EMI (Electromagnetic Interference) in benachbarten Geräten verursacht. Die Tiefpassfilter werden typischerweise so dimensioniert,

dass die Ausgangssignale einer Zulassungsnormen z.B. der CE-Norm entsprechen. In dieser Laborübung verzichten wir der Einfachheit wegen auf diese Filter.

Ansteuerspannung für Highside-Transistoren. Eine Herausforderung beim Betrieb dieser Schaltung ist die Erzeugung der Steuerspannungen u_{s1} und u_{s3} für die beiden high-side Transistoren T_1 und T_3 . Sollen z.B. die beiden Transistoren T_1 und T_4 gleichzeitig eingeschaltet sein, dann liegt das Source Potential von T_1 auf dem Potential U . Damit T_1 sicher steuert, sollte die Gate-Source Spannung U_{GS} deutlich über der Schwellspannung U_{th} liegen. Häufig wird eine Spannungen $U_{GS} = 10\text{ V}$ gewählt. Die Gate Spannung muss dann um 10 V über dem Potential U liegen. Die entsprechende Gate-Spannung gegenüber Masse kann damit ziemlich hoch werden. Beispiel dafür ist eine für die H-Brücke typische Anwendung in der ein Drehstrommotoren mit einer Betriebsspannungen von $325\text{ V} = \sqrt{2} \cdot 230\text{ V}$ gesteuert wird. D.h. die Gate Spannung muss in diesem Fall gegenüber dem Ground Potential eine Spannung von etwa 335 V aufweisen. Die Ansteuerschaltung muss also mit 335 V versorgt werden. Eine sehr einfache

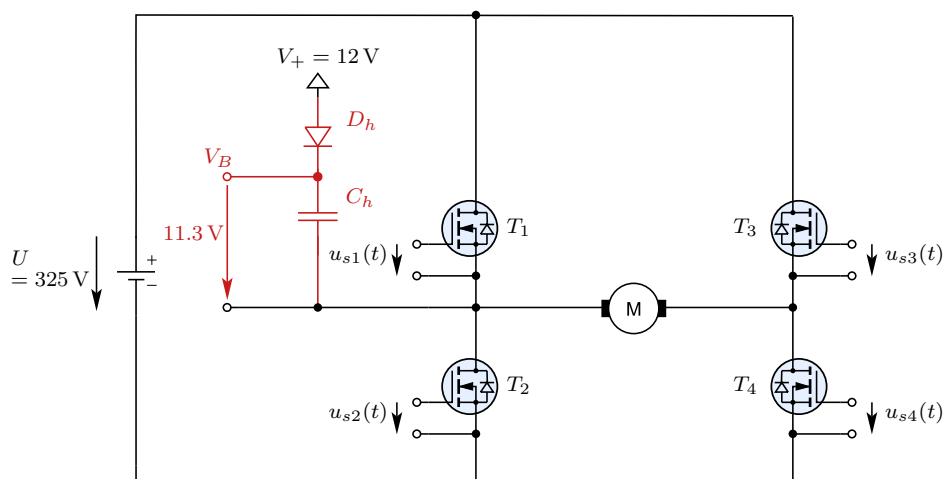


Abbildung 5: H-Brücke mit Bootstrap-Schaltung zur Gewinnung der hohen Ansteuerspannung zur Ansteuerung der high-side Transistoren.

Die Schaltung zur Erzeugung dieser Spannung kommt in modernen Schaltungen zum Einsatz und ist in Abb. 5 dargestellt. Während T_2 leitet und T_1 sperrt, wird der Kondensator C_h auf die Spannung 11.3 V aufgeladen. Schaltet nun der Transistor T_2 aus und T_1 ein, so ist die Differenz zwischen dem Potential V_B und Ground gleich $U + 11.3\text{ V}$. Für die gegebenen Spannungen wird demnach die Treiberschaltung mit $V_B = 336.3\text{ V}$ versorgt. Dies ermöglicht es der Treiberschaltung mit Gewissheit eine Spannung von 335 V an das Gate von T_1 anzulegen. Das entsprechende Schaltungsprinzip wird als Bootstrap-Schaltung bezeichnet. Bootstrapping heist soviel wie *sich selber aus den Stiefeln ziehen*.

Treiberbaustein IR2109. Für dieses Praktikum verwenden wir die Treiberschaltung IR2109 der Firma International Rectifier. Das Blockdiagramm zur Darstellung der Funktionsweise ist in Abb. 6 zu sehen.

Zur Ansteuerung der high-side Transistoren kann dieser Baustein mit Hilfe der Bootstrap-Schaltung aus Abb.5 am Pin VB versorgt werden. Als typische Anwendungsschaltung gibt das

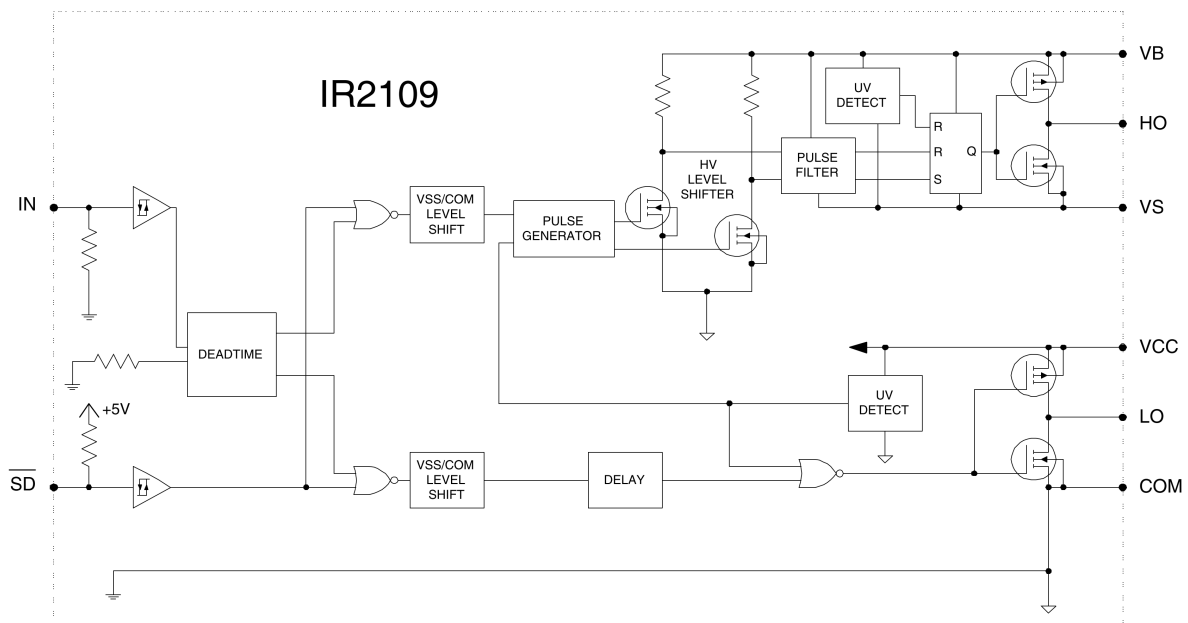


Abbildung 6: Block Diagramm des Bausteins IR2109.

Datenblatt des Treiberbausteins Abb. 7 an. Hat der Anschluss IN den Pegel High bzw. liegt er auf dem Potential V_+ , so schaltet der Treiber den Ausgang HO auf das Potential V_B und damit den High-side Transistor T_1 ein.

In einer H-Brücke dürfen die beiden übereinanderstehenden Transistoren, z.B. T_1 und T_2 in Abb. 3 nie gleichzeitig eingeschaltet sein. Dabei würde es nämlich zu einem Kurzschluss kommen und die beiden Transistoren könnten infolge eines zu hohen Stromes zerstört werden. Aus diesem Grund schaltet der Treiber immer zuerst den einen Transistoren aus bevor er den anderen einschaltet. Für diese Funktion ist der Block mit der Bezeichnung DEADTIME in Abb. 6 verantwortlich.

Der Baustein IR2109 erlaubt eine maximale Betriebsspannung von 625 V und ist damit für die oben genannte Anwendung mit $U = 325$ V einsetzbar. Wir verwenden in der Laborübung eine deutlich tiefere Motorspannung von lediglich 12 V.

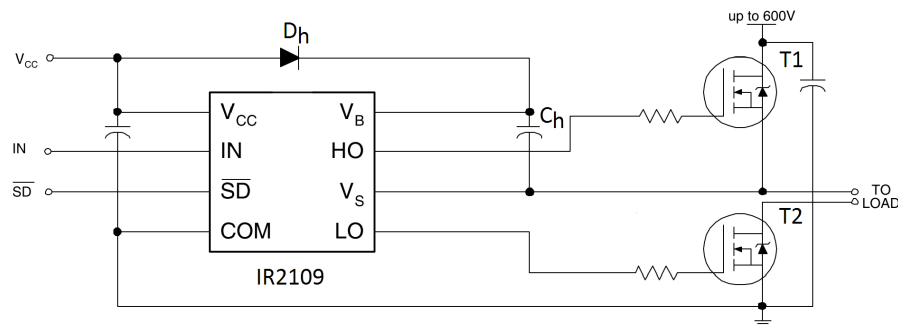


Abbildung 7: Typische Anwendung des Bausteins IR2109.

1.3 Schaltung für die Laborübung.

Die H-Brücke besteht aus zwei Gegentaktschaltungen. Es wird also für die linke und die rechte Seite der H-Brücke ein Treiber des Typs IR2109 benötigt. Die entsprechende Schaltung ist in Abb. 8 dargestellt.

Invertierte Ansteuerung der rechten Brückenhälfte. Während auf der linken Seite T_1 aktiv ist, muss auf der rechten Seite T_4 aktiv sein. Dasselbe gilt für T_2 und T_3 . Dementsprechend werden die beiden Treiber für die linke und die rechte Seite mit invertiertem logischen Pegel angesteuert. Dafür sorgt der Inverter in IC3.

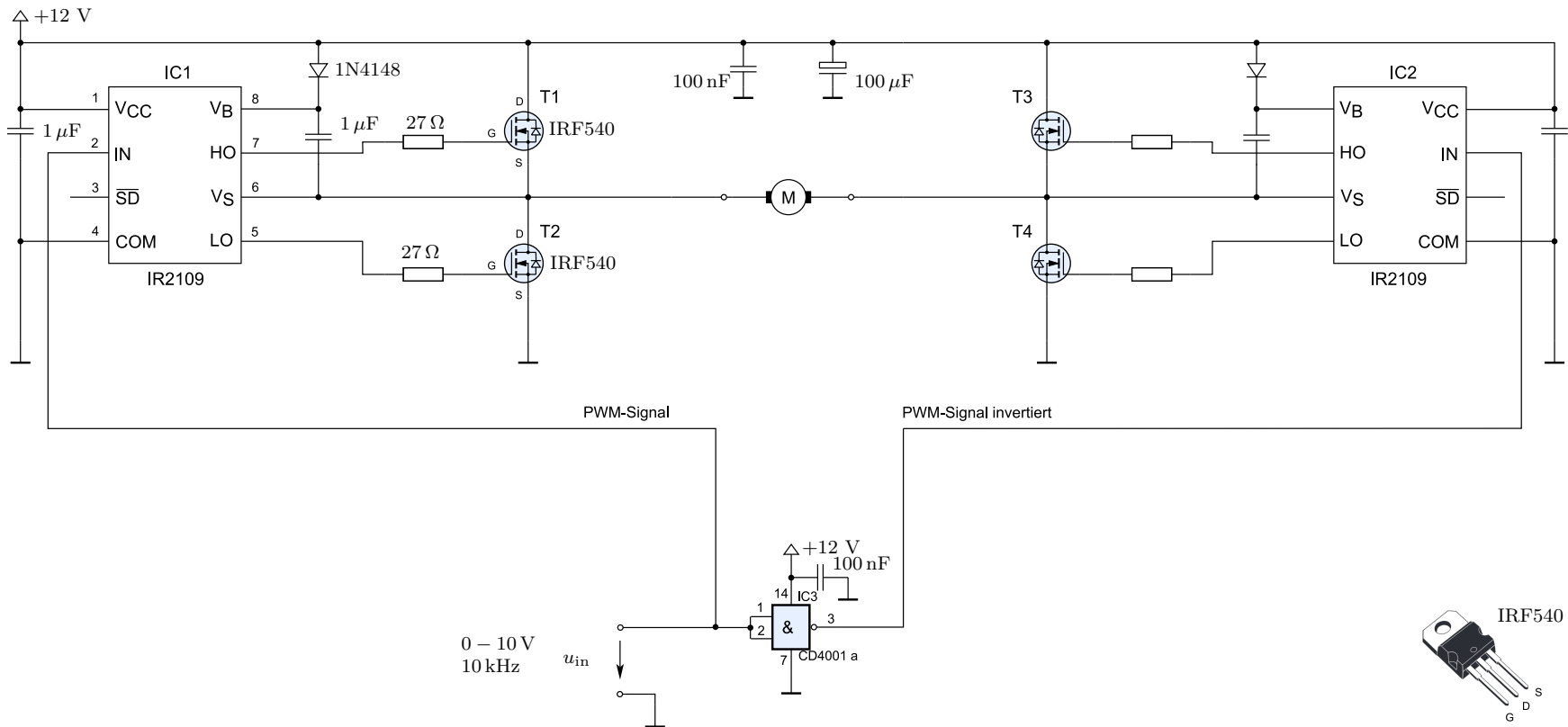


Abbildung 8: Schema zur Steuerung eines DC-Motors mit Kommutator mittels eines PWM-Signals u_{in} .

2 Laborübung Motorsteuerung

Aufbau und Test. Bauen Sie die Schaltung entsprechend Abb. 8 auf und überprüfen sie Ihre Funktion. Es ist ratsam erst die linke Hälfte und dann die rechte Hälfte jeweils aufzubauen und zu testen. Wenn die gesamte Schaltung funktioniert können Sie den Motor anschliessen. Bei welchem Tastverhältnis p steht der Motor still? Entspricht dies Ihrer Erwartung?

3 Laborübung Digitaler Audio-Verstärker

Anstatt des DC-Motors kann auch ein Lautsprecher mit der H-Brücke angesteuert werden. Um Musik wiedergeben zu können, muss das Musiksinal in ein PWM-Signal umgewandelt werden. Dies können Sie am einfachsten mit Hilfe des als Komparator geschalteten LMC6482 und dem Funktionsgenerator als Dreiecksgenerator realisieren, siehe Abb. 9.

Aufbau und Test. Bauen Sie den PWM-Modulator für das Audio-Signal auf und testen Sie diesen. Verbinden Sie die H-Brücke mit dem Lautsprecher und dem PWM-Modulator und letzteren mit dem Audio-Ausgang eines Abspielgeräts. Die Lautstärke kann durch Anpassung der Amplitude des Dreiecksignals $u_d(t)$ eingestellt werden. Wie muss die Amplitude geändert werden, um die Lautstärke zu erhöhen?

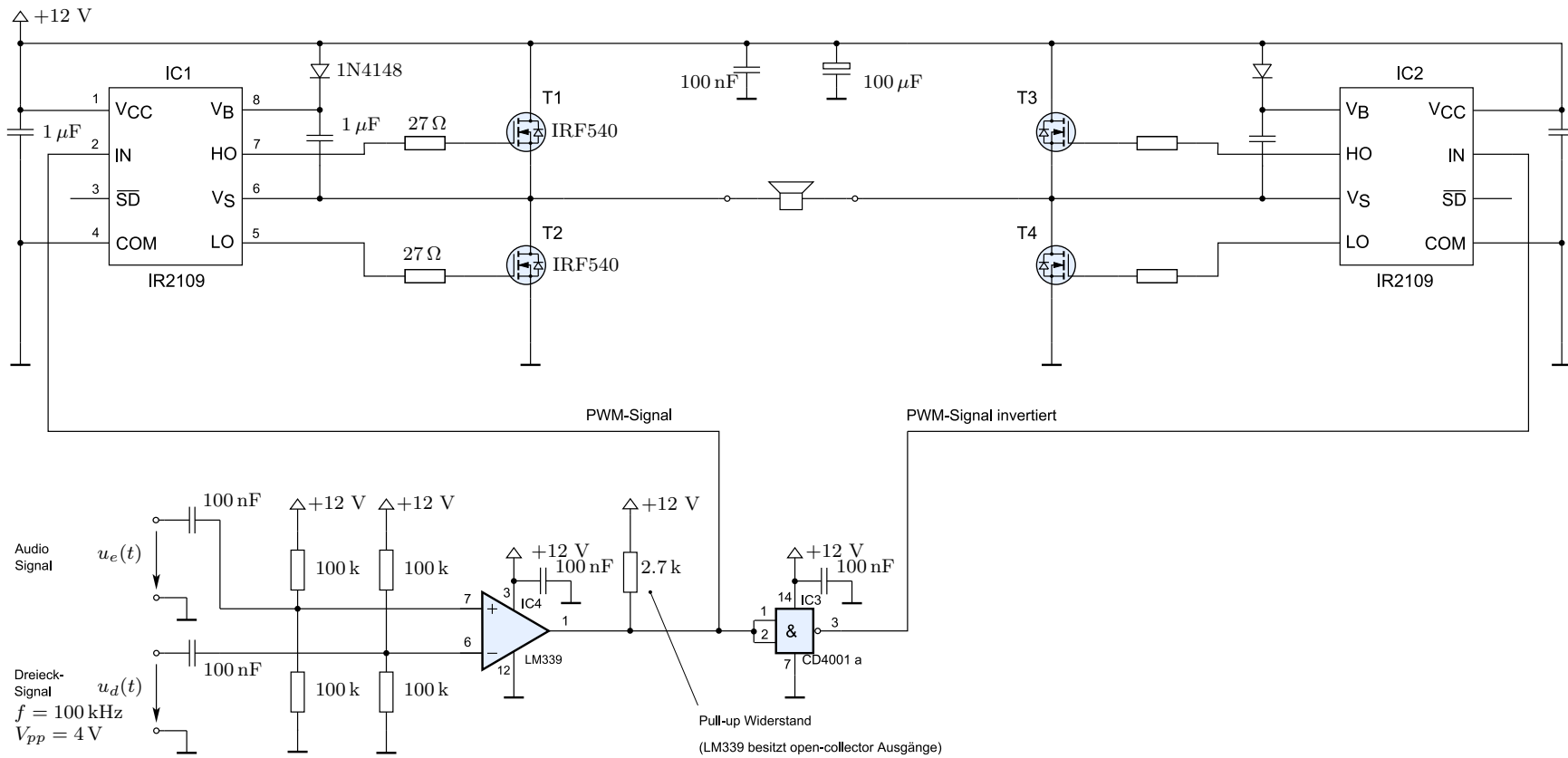


Abbildung 9: Schema eines digitalen Audio-Verstärkers mit PWM Modulator zur Steuerung einer H-Brücke.