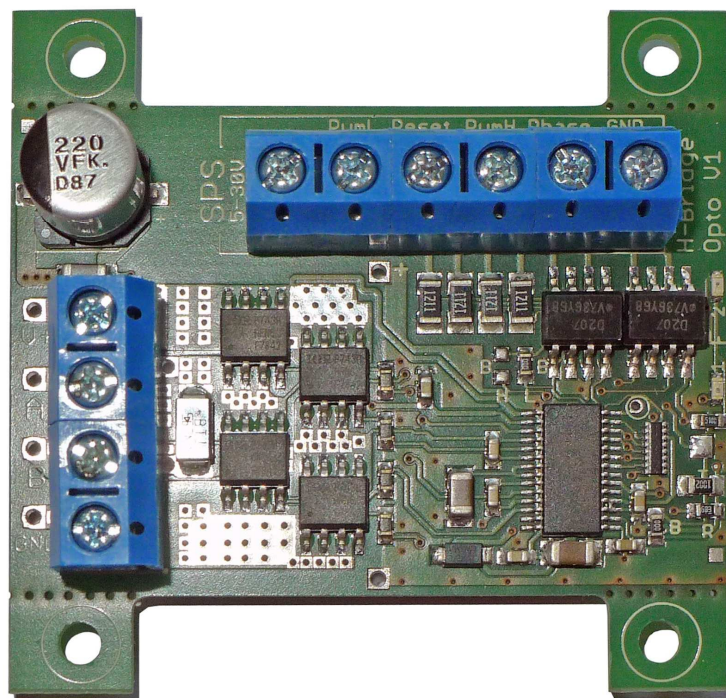


Handbuch für das H-Brückenmodul / Vierquadrantensteller

Opto VI: 24V – 18A / 140A

**V 1.30
3. Mai 2021**



© by Peter Küsters

Dieses Dokument ist urheberrechtlich geschützt. Es ist nicht gestattet, dieses Dokument zu verändern und komplett oder Teile daraus ohne schriftliche Genehmigung von uns weiterzugeben, es zu veröffentlichen; es als Download zur Verfügung zu stellen oder den Inhalt anderweitig anderen Personen zur Verfügung zu stellen. Zuwiderhandlungen werden verfolgt.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	2
Einleitung	3
Mechanik.....	3
Generelle Funktionsweise.....	4
Lieferumfang / Aufbau	5
Anschlüsse.....	6
Spannung.....	6
Anschlussleitungen	7
Motor	7
Störungsunterdrückung	7
Logiksignale.....	7
Aktivierung von PwmL.....	8
Verwendung ohne Mikrocontroller bzw. externer Elektronik zur Steuerung.....	9
Übersicht Betriebssituationen und Stromverläufe MOSFETs.....	10
Normaler Betrieb.....	10
Wegfall der Spannung am Motor (Bremsen/Freilauf):.....	10
Tabellarische Übersicht der PWM Optionen.....	12
Ausgänge zur Fehlererkennung.....	13
Spannungsversorgung:.....	14
Schutz vor induzierter Überspannung / Selbstinduktion.....	14
Tipps für die Zuleitungen / Lastleitungen / Kondensator	16
Fehlermeldung Kurzschluss - Abhilfen:	17
1) Spannungsquelle prüfen	17
2) Hinzufügung eines größeren Eingangskondensators zur Pufferung.....	17
3) Einfügen eines Lastwiderstands.....	17
4) Modifikation der Kurzschlusserkennung.....	19
Erwärmung / notwendige Kühlung.....	20
Erwärmung der MOSFETs	20
Erwärmung der Leiterbahnen.....	21
Kühlung / Einbau in ein Gehäuse	21
Kühlkörper Form / Farbe.....	22
Parallelschaltung von H-Brücken	22
PWM Frequenz.....	23
Technische Daten.....	25
Exkurs Einschaltströme.....	26
Exkurs: induzierte Überspannung / Selbstinduktion / parasitäre Induktion	27
Fall 1 (Überspannung auf der Lastleitung durch die induktive Last)	27
Fall 2 (Überspannung durch parasitäre Induktion auf der Lastleitung) &.....	28
Fall 3 (Überspannung d. parasitäre Induktion auf der Versorgungsleitung)	28
Exkurs PWM	31
PWM Geschwindigkeit.....	32
Errata:.....	34
Haftung, EMV-Konformität	35

Einleitung

Herzlichen Glückwunsch zum Erwerb des H-Brückenmoduls mit Optokopplern. Das Modul kann entweder als „normale“ H-Brücke oder als Vierquadrantensteller genutzt werden.

Dieses Modul steuert über wenige Signale (Minimum: zwei) die Geschwindigkeit und die Laufrichtung von Lasten, z.B. Gleichstrom-Elektromotoren. Durch den aufwändigen Aufbau und dem äußerst geringen Innenwiderstand der Transistoren (MOSFETs) können Sie auch sehr leistungsfähige Motoren steuern, die die Brücke mit einem Dauerstrom von bis zu 18A belasten; dabei sind Impulsströme von über 100A erlaubt und möglich.

Dieses Modul bereits ab Versorgungs- (Motor)spannungen ab 5,5 Volt einsetzbar (Logiksignale von 1,8 Volt bis 30 Volt)

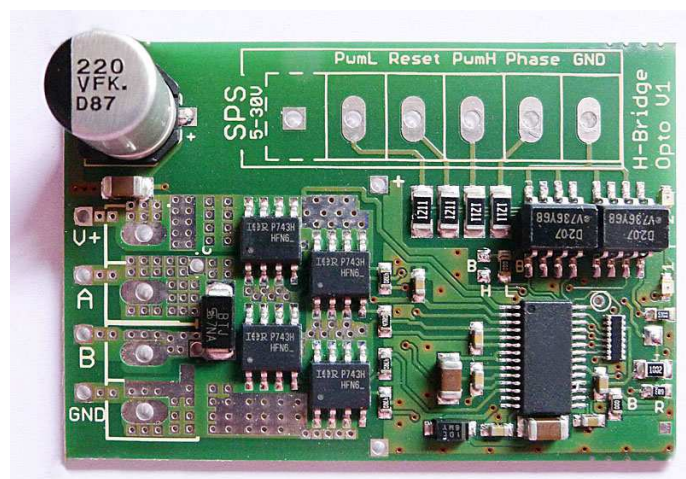
Auf Wunsch (bei Abnahmemengen ab 50 Stück) können wir die H-Brücke auch in den folgenden Ausführungen liefern:

- 30V mit max. 21A Dauerstrom (kurzfristig 210A)
- 40V mit max. 18A Dauerstrom (kurzfristig 180A)
- 50V mit max. 12A Dauerstrom (kurzfristig 97A)
- 60V mit max. 12A Dauerstrom (kurzfristig 97A) (recht aufwändig und teurer, aber machbar)

Anmerkung: auch wenn wir in diesem Handbuch immer von Motor sprechen, können Sie trotzdem quasi jede beliebige ohmsche oder induktive Last an diese H-Brücke anschließen (Lampen, Transformatoren etc.). Das Wort „Motor“ steht also in diesem Handbuch stellvertretend für „Last“.

Mechanik

Das Modul ist auf geringe Größe hin entwickelt worden und kommt mit einem Platz von lediglich 36 x 53 mm aus; inkl. der vier entfernbaren Montagehalter sind es immer noch nur 51 x 53 mm. Diese Montagehalter sind vorperforiert, so dass Sie sie mit einer Zange leicht und sauber abbrechen können. Wir empfehlen jedoch, die Montagehalter sicherheitshalber bis zur endgültigen Positionierung des Moduls in Ihrer Baugruppe nicht zu entfernen.

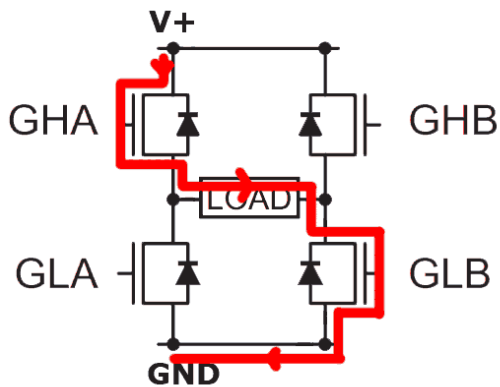


Generelle Funktionsweise

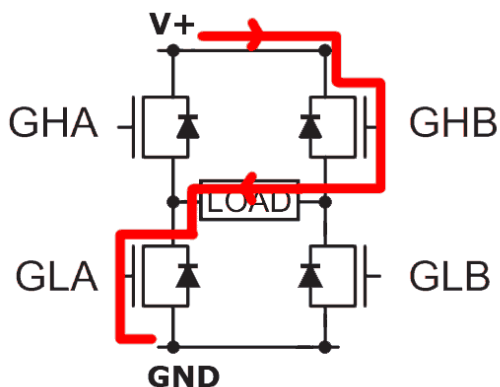
Eine H-Brücke, auch Vierquadrantensteller genannt, erhält ihre Bezeichnung aus dem H-förmigen Aussehen der Beschaltung. Hierbei steuern 4 MOSFET die Last (i.d.R. ein Motor) an. Der Ansteuerchip auf der Platine kümmert sich um das Timing und die Signalkontrolle und sorgt in einem Fehlerfall für die Abschaltung. Die vorliegende H-Brücke entkoppelt durch Optokoppler die Eingänge galvanisch von der Betriebsspannung.

Von den 4 MOSFETs auf der H-Brücke schalten immer zwei Stück gleichzeitig durch und erlauben somit ein Umpolen der Spannung. Dies ist z.B. notwendig, um einen Motor Vorwärts und Rückwärts drehen zu lassen.

Beispiel 1: Motor soll links herum drehen. Der Strom muss von links nach rechts durch den Motor (LOAD) fließen. Dazu wird der obere linke und der untere rechte MOSFET geschaltet.



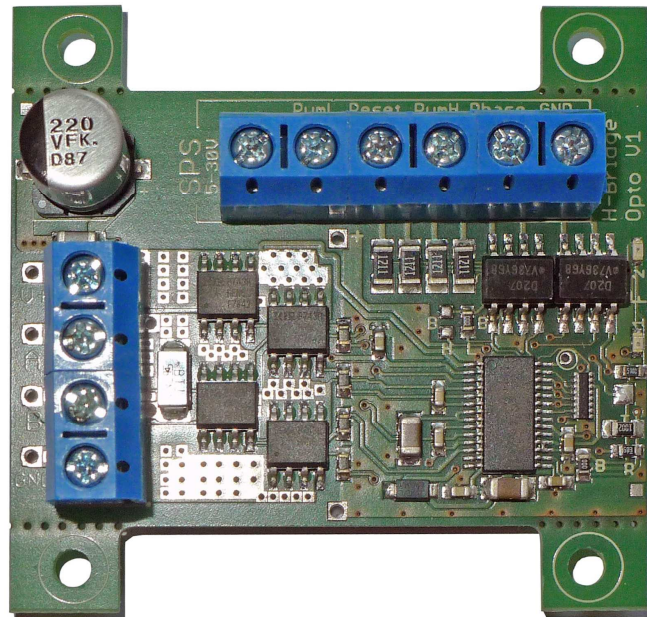
Beispiel 2: Motor soll rechts herum drehen. Der Strom muss für den Drehrichtungswechsel von rechts nach links durch den Motor fließen. Dazu wird nun der obere rechte und der untere linke MOSFET geschaltet.



Lieferumfang / Aufbau

Die H-Brücke wird zusammen mit den Anschlussbuchsen geliefert, die Sie noch einlöten müssen, wenn Sie sie verwenden möchten. Alternativ können Sie natürlich die Leitungen für Versorgungsspannung, Last und Logiksignalen direkt einlöten. Ein evtl. mitbestellter Kühlkörper ist auf dem Bild nicht abgebildet.

Sofern die Anschlussstecker Teil des Lieferumfang sind und Sie sie benötigen, löten Sie diese bitte ebenfalls ein. Die blauen Anschlussstecker sollten Sie vor dem Einlöten durch die vorhandenen seitlichen Nut/Feder-Verbindungen miteinander verbinden (zusammenschieben). Die blauen verschraubbaren Anschlussklemmen sind bis 15A spezifiziert, wenn Sie größere Ströme erwarten, löten Sie die Kabel bitte direkt ein.



Die geringen Ausmaße der Platine bedingen im Hochstrombereich geringe (im Verhältnis zu den möglichen Strömen) Leiterbahnquerschnitte. Daher werden die Leiterbahnen auf beiden Seiten der Platine geführt und zudem mit vielen Durchkontaktierungen versehen. Dies sorgt für eine gute Strom- und Temperaturverteilung. Nur dadurch ist es möglich, dass diese kleine Platine Dauerströme bis 21A verträgt (Impulsströme bis 200A).

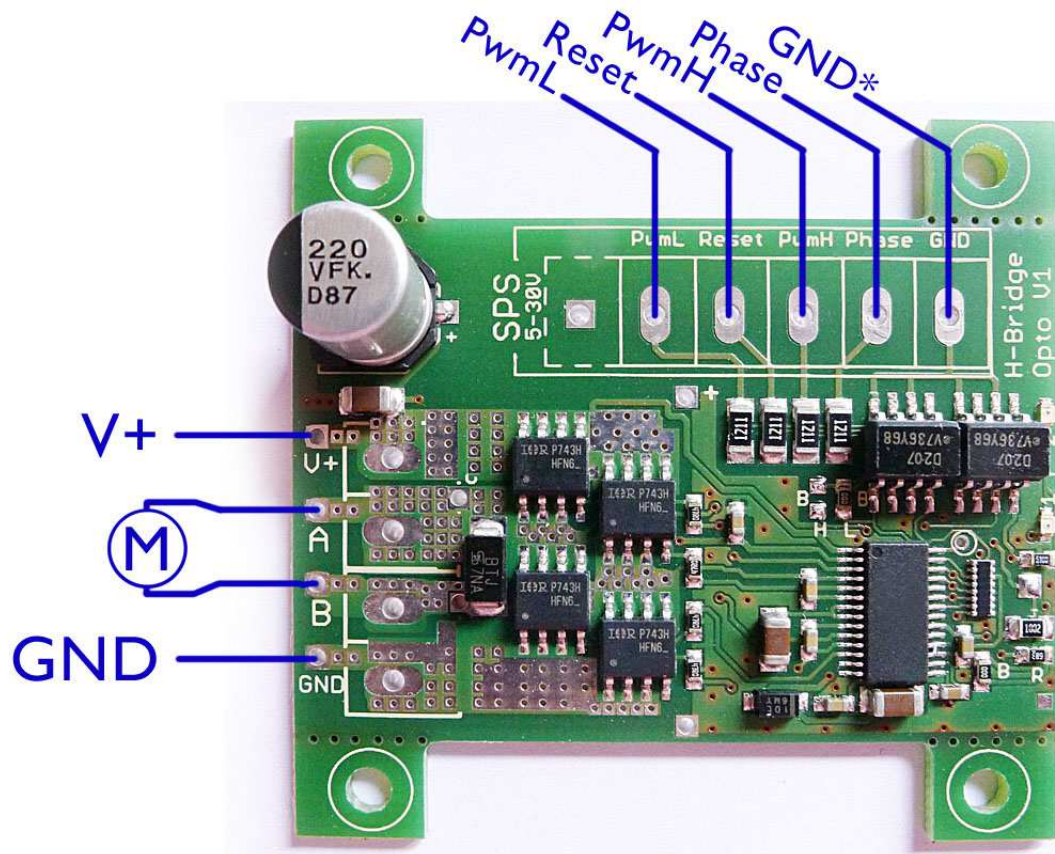
Wichtig: Beim Einlöten der Kabel oder der Anschlussstecker achten Sie bitte darauf, die Kontakte und Platine gut zu erhitzen und mit genügend Lot zu arbeiten, sodass das Lot beim Einlöten auch weit (idealerweise bis zur anderen Platinenseite) in die Durchkontaktierung laufen kann. Dies verbessert die Stromverteilung direkt vom Anschlussstecker auf die Leiterbahnen beider Platinenseiten.

Die nachfolgenden Seiten beschreiben den Aufbau, die Funktionsweise und die Limitierungen dieser H-Brücke. Um die H-Brücke klein und kostengünstig zu halten und trotzdem für 90% aller Anwendungen hervorragend geeignet zu sein, mussten gewisse Kompromisse bei der Entwicklung gemacht werden. **Bitte behalten Sie beim Lesen der folgenden Seiten im Hinterkopf, dass wir für Sie jederzeit eine individuell modifizierte Variante fertigen können.**

Wann immer die existierende universelle H-Brücke Ihren Anforderungen also nicht genügt: wir wandeln sie gerne auf Wunsch ab bzw. entwickeln für Sie eine individuelle, sich exakt an Ihrem Bedarf ausgerichtete Variante. Sprechen Sie uns einfach an.

Anschlüsse

Im nachfolgenden Bild erkennen Sie die Anschlüsse des Moduls.



Spannung

An **V+** und **GND** wird Ihre Versorgungsspannung für den Motor gelegt. Diese darf zwischen 5,5 Volt und 26V betragen.

Die Logiksignale zum Steuern dürfen zwischen 1,8 und 30 Volt betragen. Die Logiksignale werden über die integrierten Optokoppler galvanisch von der H-Brücke getrennt. **GND*** ist ebenfalls von GND der Versorgungsspannung getrennt.

Achten Sie beim Anschluss einer Spannungsquelle darauf, dass diese auch genügend Strom liefern kann. Ein Motor, mit einem Anlaufstrom mit z.B. 10A kann evtl. NICHT durch ein 5A Netzteil betrieben werden (auch wenn der Motor im Standardbetrieb vielleicht nur 1A benötigt). Der Grund: Die Spannung des Netzteils bricht beim Anlaufen des Motors ein und das Board interpretiert dies als Kurzschluss. Um dies zu verhindern, ist die eine oder andere Vorkehrung notwendig. Mehr dazu im Kapitel Fehlermeldungen auf Seite 17.

Wenn Sie mit der H-Brücke größere Leistungen schalten, dann fügen Sie bitte einen weiteren Elko mit 1.000µF oder mehr hinzu (siehe auch Seite 16). Er sollte direkt vor der H-Brücke installiert werden. Bei der Gelegenheit sollten Sie dann parallel zum Elko noch eine Supressordiode (ca. 35V bei der 40V-Brücke) hinzuschalten. Den Grund hierfür erfahren Sie im Kapitel parasitäre Induktion auf Seite 28 (Fall 3).

Anschlussleitungen

Beachten Sie bitte, dass die genutzten Leitungen (Lastspannung und Motor) ausreichend dimensioniert werden. Als Daumenregel gilt: pro 10 Ampere 1 mm² Querschnitt. Mit einem 2,5mm² Kabel sind Sie also in der Regel gut gerüstet. Zu dünne Leitungen bei der Versorgungsspannung können wg. des verbundenen Spannungseinbruchs zu einer falschen Kurzschlussfehlermeldung führen.

Bitte beachten Sie zudem bei der Wahl und der Verlegung der Anschlussleitungen (sowohl zur Spannungsversorgung als auch zur Last) unbedingt die Anmerkungen zur parasitären Induktion auf Seite 27ff, speziell Seite 28 (Fall 2 & Fall3).

Motor

An den Anschluss „M“ wird Ihr Motor angeschlossen – die Polung des Motors ist unerheblich, denn die Laufrichtung des Motors legen Sie über das Logiksignal *Phase* fest (siehe nächstes Kapitel). Die MOSFETs sind sehr robust und haben einen sehr geringen Innenwiderstand, der Motor kann theoretisch beim Anlauf einen Strom von bis zu 140 Ampere und im Betrieb einen Dauerstrom von max. 18 A ziehen. Bitte lesen Sie auch unbedingt das Kapitel „Kühlung“.

Anmerkung 1: Die Brücke kann bei hohen Strömen jedoch in den Fehlermodus „Kurzschluss“ gehen – bitte lesen Sie hierzu das Kapitel „Kurzschluss“ auf Seite 17.

Anmerkung 2: Um die H-Brücke gegen durch den Motor induzierte Überspannung zu schützen, lesen Sie bitte **unbedingt** das Kapitel „Schutz vor Überspannung“ auf Seite 15.

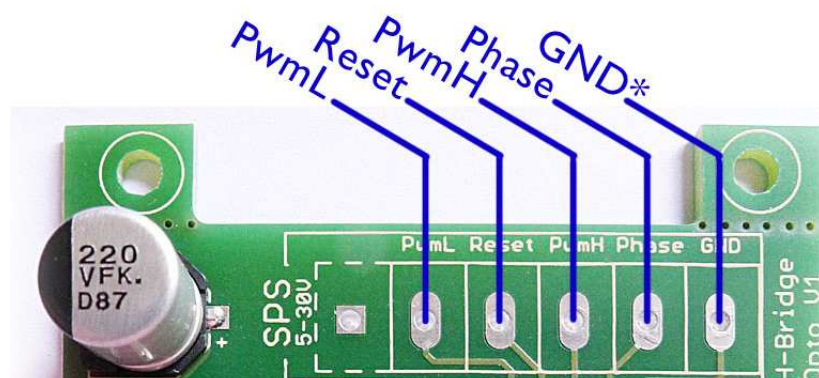
Störungsunterdrückung

Bitte beachten Sie, dass der Betrieb von Motoren, speziell bei PWM-Betrieb, u.U. Störungen verursachen wird. Wir empfehlen daher, parallel zum Motor (direkt am Motor) einen ca. 10nF großen Kondensator anzuschließen (Spannungsfestigkeit des Kondensators: mindestens doppelte Betriebsspannung, bei 24V also 50V oder mehr).

Weitere Details zu Spannung/Strom erfahren Sie Kapitel Spannungsversorgung.

Logiksignale

Über die Kontakte am oberen Rand steuern Sie das Modul – z.B. mittels eines Mikrocontrollers oder einer SPS. Die Signalpegel dürfen zwischen 1,8V und 30V betragen und sind über Optokoppler galvanisch vom Rest der H-Brücke getrennt. GND am oberen Rand ist nur für die Logiksignale zuständig und ebenfalls galvanisch von GND der Versorgungsspannung getrennt.



Eingänge

Für die Steuerung grundsätzlich wichtig und notwendig sind nur die **Leitungen PwmH und Phase**:

Mit **Phase** wechseln Sie die Laufrichtung des Motors.

Mit **PWM** wählen Sie die Geschwindigkeit. Ein dauerhaftes High-Signal bedeutet volle Geschwindigkeit, ein Low-Signal bedeutet Stopp. Mittels eines pulswidenmodulierten Signals sind Sie in der Lage, den Motor in jeder gewünschten Geschwindigkeit zu betreiben.

Mehr zu PWM im Allgemeinen finden Sie in unserem Exkurs PWM ganz am Ende dieses Manuals. **Wichtige Informationen zur Wahl der korrekten Tastverhältnisse in Bezug auf die jeweilige PWM Frequenz finden Sie auf Seite 23.**

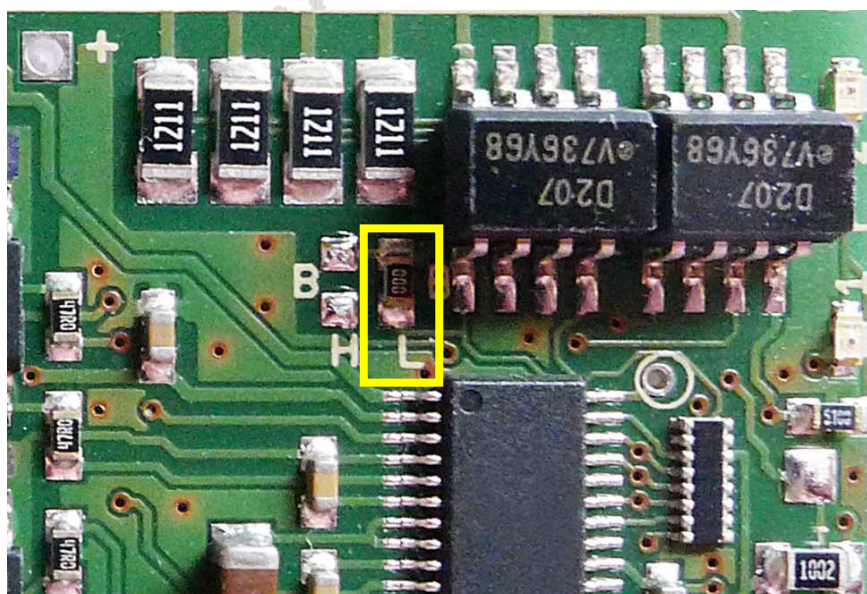
Die Leitung **Reset** ist so beschaltet, dass ein kurzer High-Impuls vom Mikrocontroller / SPS das Modul im Fehlerfall zurücksetzt bzw. bei einem dauerhaften High, das Modul in den Sleep-Modus versetzt. Der Aufweckvorgang (Low) benötigt ca. 3ms.

Ohne beschaltete Reset-Leitung ist das Modul dauerhaft eingeschaltet (es sei denn bei einem erkannten Fehler wie z.B. Kurzschluss – siehe Kapitel Fehlermeldungen auf Seite 17). Hinweis: Zwar ist das Modul also theoretisch ohne Reset-Beschaltung zu betreiben (da nur ein High ein Reset auslöst), in der Praxis sollten Sie die Reset-Leitung jedoch beschalten, damit Sie das Modul im Fehlerfall auch zurücksetzen können.

Alle Logiksignale dürfen einen High-Pegel zwischen 1,8 Volt und 5 Volt haben (Low: 0 bis 0,7 Volt).

Aktivierung von PwmL

Standardmäßig wird die Brücke so geliefert, dass das Signal für PwmL permanent auf High liegt. Ein Low ist nicht möglich. Erst nach dem Entfernen (Auslöten) der 0 Ohm Brücke am Feld „L“ ist es möglich, PwmL per Optokoppler zu steuern.



Durch Einlöten einer Brücke (oder mit einem dicken Klecks Lot), können Sie das Feld nachträglich wieder schließen. Durch Schließen des links danebenliegenden Feldes „H“ mit einer Brücke, ist es übrigens auch möglich, **PwmH** dauerhaft an High zu legen.

Alternativer Betrieb: Vierquadrantensteuerung z.B. für Servosysteme

Durch dauerhaftes Anlegen eines High-Signals an *PWM* sowie eines PWM Signals an *Phase* können Sie eine volle Vierquadrantensteuerung für Servosysteme vornehmen. Hier dreht mit einem PWM Verhältnis von 0 bis 50% der Motor nach links (langsam bis schnell), bei genau 50% stoppt er und bei 50 bis 100% dreht er nach rechts.

Verwendung ohne Mikrocontroller bzw. externer Elektronik zur Steuerung

Eigentlich ist das Board mit der Zielsetzung entwickelt worden, es durch einen Mikrocontroller bzw. einer SPS zu steuern. Hin und wieder gibt es aber evtl. die Notwendigkeit, den Motor zwar zu steuern, dies aber lediglich z.B. durch „normale“ Schalter zu bewerkstelligen.

In diesem Fall verbinden Sie GND und GND* und legen die Versorgungsspannung (z.B. 24V) über Schalter/Taster an die entsprechenden Logikeingänge an.

Beispiel: Schalten eines Motors mit Links-/Rechtslauf:

Wichtig: GND und GND* muss miteinander verbunden sein

PwmH	Phase	Ergebnis Ausgang
V+	V+	Motor dreht links herum
V+	-	Motor dreht rechts herum
-	V+	Motor aus
-	-	Motor aus

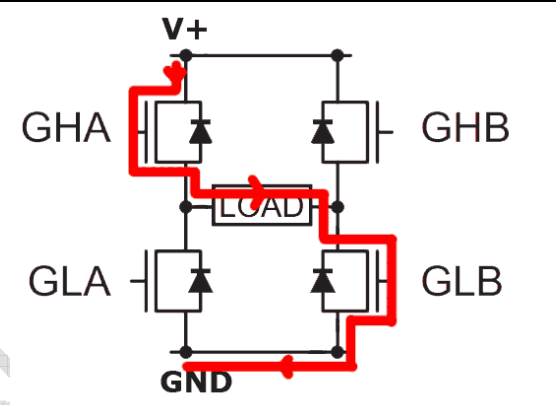
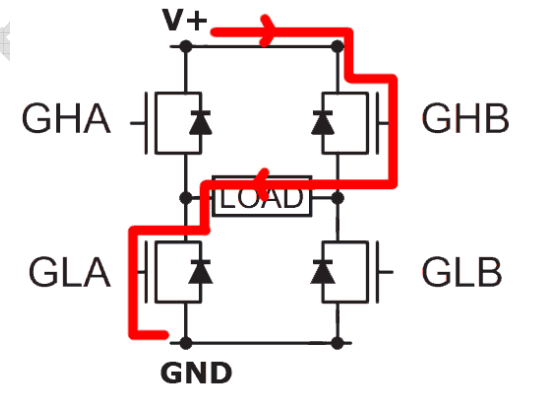
Übersicht Betriebssituationen und Stromverläufe MOSFETs

Normaler Betrieb

Mittels des PWMH Signals werden die mit dem Signal *Phase* festgelegten Transistoren ein- oder ausgeschaltet. Mittels *Phase* wird die Drehrichtung des Motors festgelegt.

PWML ist standardmäßig fest auf High gelegt (deswegen ist PWML=I in der nachfolgenden Übersicht auch hellgrau), sodass die Steuerung ausschließlich per PWMH geschieht. Sie brauchen also kein Signal an PWML anlegen – es liegt immer an High.

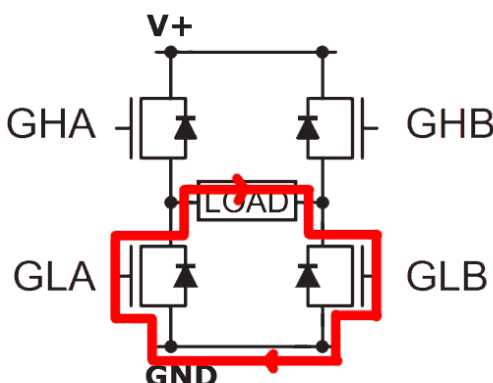
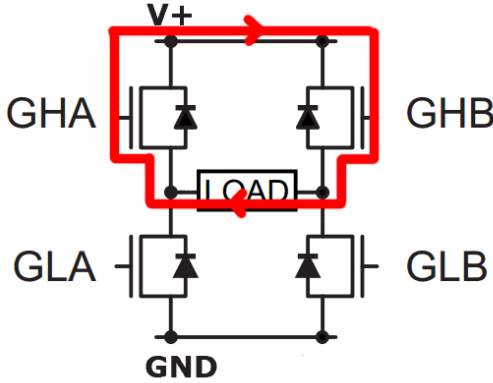
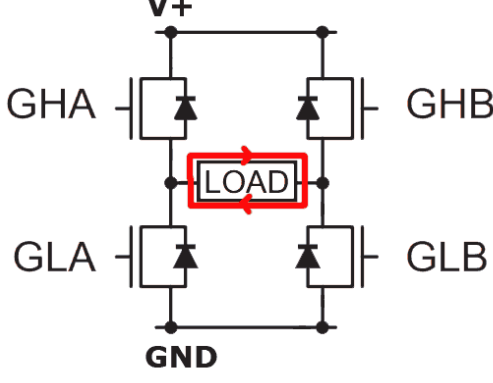
Erst nach dem Entfernen einer vorhandenen Brücke (siehe Seite 8) können Sie PWML auch per Logiksignal steuern. Da der Normalfall jedoch der Betrieb mit auf High definiertem PWML Signal ist, haben wir es bereits so vordefiniert.

Motor antreiben	
<p>PWMH = I PWML = I Phase = I</p> <p>Motor dreht rechts herum. Fast decay</p>	
<p>PWMH = I PWML = I Phase = 0</p> <p>Motor dreht links herum. Fast decay</p>	

Wegfall der Spannung am Motor (Bremsen/Freilauf):

Achtung, der Motor dreht sich bei Wegfall der Versorgungsspannung (z.B. durch die Massenträgheit) noch weiter und arbeitet dann als Generator. Hierbei treten u.U. hohe Spannungen auf. Daher ist eine Suppressordiode bei einer induktiven Last sinnvoll. Aber auch bei reinen ohmschen Lasten können bereits die Zuleitungen eine Induktivität darstellen (siehe Seite 27ff).

Diese H-Brücke ist auf der Lastseite bereits mit einer Suppressordiode ausgestattet. Zudem kann es – besonders bei größeren Strömen bzw. länger andauerndem Generatorbetrieb – sinnvoll sein, eine weitere externe bidirektionale! Suppressordiode mit der notwendigen Stromfestigkeit direkt am Motor zu verbauen.

Motor läuft aus (Bremsen / Leerlauf)	
<p>PWMH = 0 PWML = 1 Phase = 1 oder 0 Slow decay</p> <p>Motor wird abgebremst (Kurzschluss über die Mosfets, je nach Phase Paar 1 oder 2).</p>	
<p>PWMH = 1 PWML = 0 Phase = 1 oder 0 Slow decay</p> <p>Also wie oben, jedoch mit PWML und PWMH vertauscht. Das Verhalten der H-Brücke gegenüber der Last ist identisch, lediglich wird nun ein anderes Mosfet-Paar angesteuert.</p>	
<p>PWMH = 0 PWML = 0 Phase = 1 oder 0 Fast decay</p> <p>Freilauf – keine Beeinflussung durch die Mosfets.</p>	<div style="text-align: center;">  </div> <p>Die zum Schutz der Mosfets optionale bidirektionale Suppressordiode (liegt parallel zur Last) wird induzierte Spannungen. Sie wird bei Spannungen oberhalb der Versorgungsspannung leitend und ist für den Motor quasi ein Kurzschluss (d.h. bei einer 24V Diode für Spannungen >26V). Allerdings: Die Diode ist nicht für lange Zeit belastbar, sollte der Freilauf öfters und/oder länger dauern, dann müssen Sie direkt am Motor noch eine belastbare Suppressordiode (evtl. mit Kühlkörper) verbauen.</p>

Tabellarische Übersicht der PWM Optionen

Steuerungssignale			PWM / Effekt		Decay	Modus
PWM H	PWM L	Phase	100%	0%		
I	I	PWM	A⇒B	B⇒A	Fast	4-Quadrantensteuerung, bei 50% PWM: Durchschnittlicher Stromverbrauch 0
PWM	I	I	A⇒B	Bremsen	Slow	High-side PWM, low-side MOSFET recirculation
		0	B⇒A			
I	PWM	I	A⇒B	Bremsen	Slow	Low-side PWM, high-side MOSFET recirculation
		0	B⇒A			
0	0	egal	Freilauf	Freilauf	Fast	Freilauf, alle MOSFets aus

Anmerkung:

Bitte berücksichtigen Sie speziell beim Bremsen die Auswirkung der jeweiligen Modi auf die Last. Besonders zu nennen wären hier als Beispiele:

- Abfallverzögerung bei Relais / Magneten
- Bremswirkung/Freilauf bei Motoren etc.
- Abbau der Überspannungen (Vernichtung im Mosfet - Wärmeentwicklung)

Ausgänge zur Fehlererkennung

Über die beiden Fehler LEDs 1 und 2 (siehe Foto unten) können Sie einen evtl. Fehlerstatus auslesen. Die beiden LEDs können codiert insgesamt vier Status (*ja das ist der Plural – nicht „Stati“ und auch nicht „Statusse“*) ausgeben, die mehrere Fehlermeldungen abdecken können.

LED 1	LED 2	Bedeutung	Motor wird abgeschaltet?	Fehlermeldung wird automatisch zurückgesetzt?
On	On	Kein Fehler. Alles OK.	-	-
On	Off	Kurzschluss gegen Masse (**)	Ja	Nein (*)
On	Off	Kurzschluss gegen V+ (**)	Ja	Nein (*)
On	Off	Kurzschluss am Motor (**)	Ja	Nein (*)
Off	On	Übertemperatur am Steuerchip	Nein	Ja
Off	Off	Zu geringe Versorgungsspannung	Ja	Ja

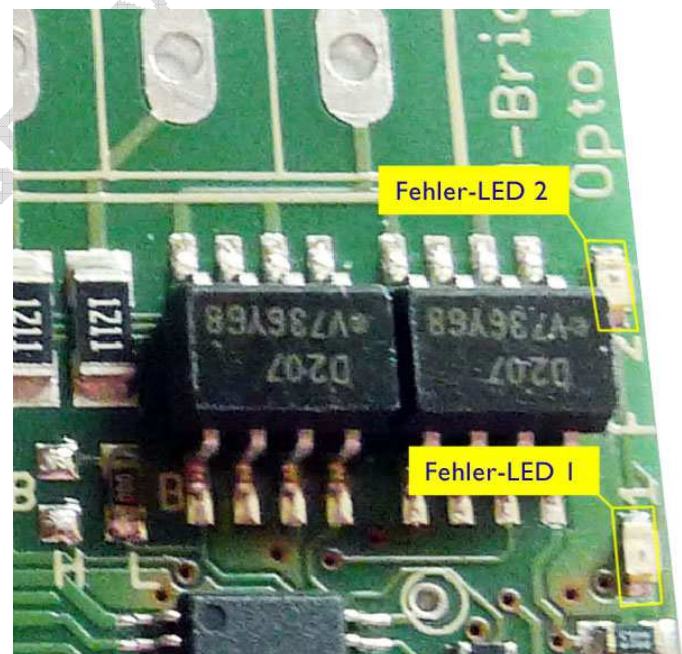
(*) = Sicherheitshalber ist hier ein Reset zum Rücksetzen notwendig

(**) = Alternativ ist auch ein Zusammenbruch der Spannung als mögliche Fehlerquelle in Betracht zu ziehen (Netzteil kann nicht genug Strom liefern). Bitte beachten Sie bei der Fehlermeldung Kurzschluss auch die Anmerkung zur Spannungsversorgung im folgenden Kapitel und die Tipps bei Kurzschluss ab Seite 17.

Bei einigen Fehlermeldungen wird der Motor automatisch abgeschaltet um Schäden zu vermeiden. Je nach Fehlermeldung wird diese automatisch zurückgesetzt, wenn der Fehler nicht mehr vorliegt.

Bei Kurzschlüssen muss der Fehler zuerst behoben und über die Reset-Leitung quittiert werden, vorher ist kein Betrieb mehr möglich.

Das Flag Übertemperatur ist nur eine Information - hier findet keine automatische Abschaltung statt. Das Flag wertet die Übertemperatur (> 150°C-170°C) am Steuerchip aus (automatische Rücksetzung der Fehleranzeige nach Temperaturabfall um mind. 15°C).



Achtung: Eine Übertemperatur der MOSFETs wird nicht detektiert. Hier müssen Sie bei Bedarf selber noch einen Temperatursensor anbringen und über den Mikrocontroller auswerten.

Das Flag Übertemperatur ist zudem nur eine Information - hier findet keine automatische Abschaltung statt. Das Flag wertet lediglich die Übertemperatur (> 150°C-170°C) am Steuerchip aus (automatische Rücksetzung nach Temperaturabfall um mind. 15°C).

Spannungsversorgung:

Das Modul wird über die Anschlüsse V+ und GND mit Spannung versorgt.

Die **Mindestspannung** beträgt 5,5 Volt.

Die **maximale erlaubte Eingangsspannung** beträgt 26 Volt.

Anmerkung: die verwendeten Mosfet-Typen erlauben eine maximale Eingangsspannung von 40V, die Motorleitung ist mit einer bidirektionalen 24V Supressordiode abgesichert (fängt ab ca. 26V an zu leiten), so dass die H-Brücke gegen Spannungsspitzen auf der Motorleitung gut geschützt ist.

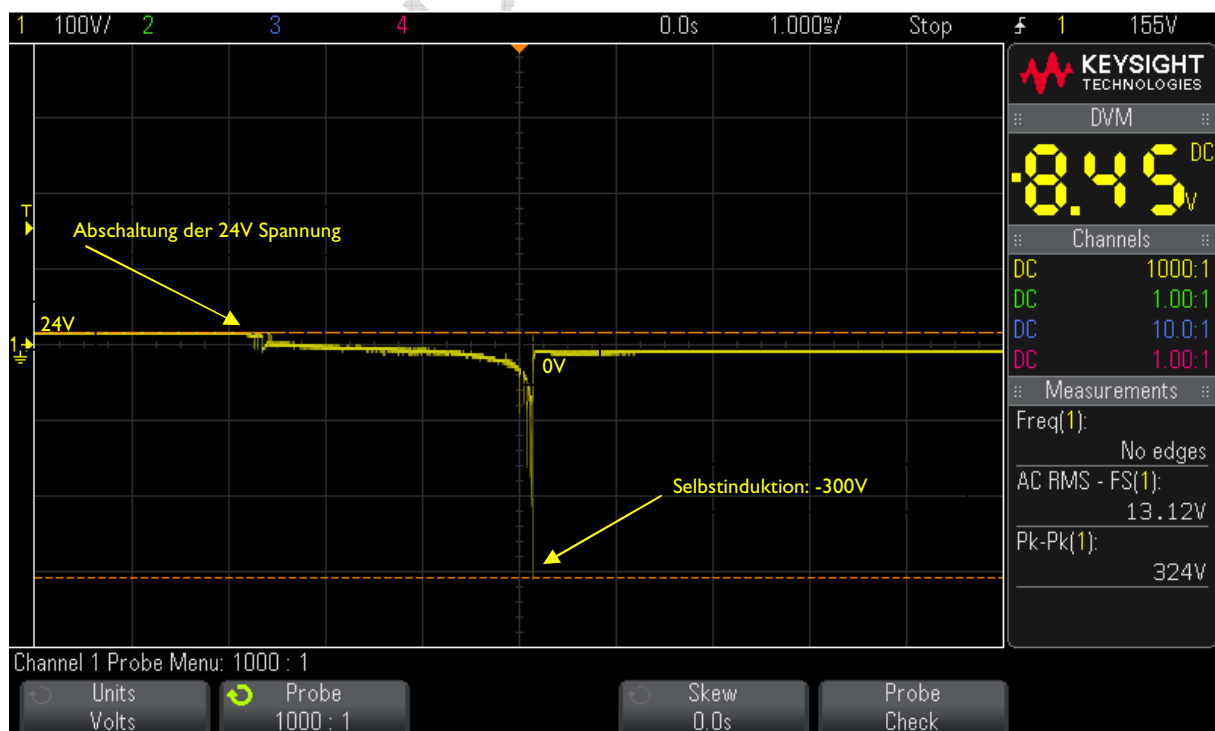
Die Spannung der Logiksignale (High) dürfen Dank der Optokoppler zwischen 1,8 und 30V betragen.

Schutz vor induzierter Überspannung / Selbstinduktion

Jede induktive Last (Motoren, Elektromagnete etc.) produziert bei Abschaltung der Spannung eine der bisherigen Spannung entgegengesetzte Selbstinduktionsspannung durch den Abfall des Magnetfeldes. Diese Spannung kann schnell das 10- oder 20-fache der angelegten Spannung betragen. Bei 24V Eingangsspannung kann die Selbstinduktionsspannung also durchaus bis zu 500 Volt betragen.

Diese Spannung wird der H-Brücke zugeführt und **MUSS** abgebaut werden, bevor sie die MOSFETs erreicht, denn sie würden diese **sofort** zerstören.

Das nachfolgende Bild zeigt die Spannungsversorgung eines kleinen Elektromagneten, dessen 24V Betriebsspannung abgeschaltet wurde: die Selbstinduktionsspannung steigt binnen 3ms auf über 300 Volt!



Um die H-Brücke vor solchen Überspannungen zu schützen, wurde daher eine bidirektionale Supressordiode (26 Volt) integriert. Diese wird ab 26V leitend und schließt die Motorleitung kurz, sobald Spannungen von über 26V auftreten. Sie schützt somit die H-Brücke vor Zerstörung, denn die Selbstinduktionsspannung wird somit während des Entstehens bereits ab 26V kurzgeschlossen und somit abgebaut.

Übrigens: ein sich (noch) drehender Motor mit abgeschalteter Spannung am Eingang wird zum Generator, erzeugt also selber eine Spannung. Auch diese wird ab 26V von der Suppressodiode abgebaut und schützt also die H-Brücke auch vor solchen Spannungen.

Dieser Schutz ist jedoch nur eine letzte Schutzbastion. Verlassen Sie sich nicht darauf! Je nach Häufigkeit dieser Selbstinduktion reicht diese Diode nicht aus, so dass es grundsätzlich immer empfehlenswert ist, eine separate bidirektionale TVS bzw. Supressordiode und/oder einen Varistor* direkt an die Last sowie eine weitere direkt vor der H-Brücke anzuschließen.

Die notwendige Leistung (bei Ansprechen der Diode fließen kurzzeitig hohe Ströme) der Diode/Varistor müssen Sie der Last und der Höhe/Dauer der erzeugten Spannung/möglichen Ströme anpassen. Zerstörte MOSFETs (i.d.R. schließen sie kurz und platzen dann auf) sind quasi immer ein Zeichen von induzierter Überspannung.

*= Varistoren schließen Überspannungen ebenfalls kurz, sind jedoch aus Oxid aufgebaut. Einzelne Oxidkörner schließen ab einer bestimmten Spannung kurz und verbrennen dann. Sie sind dann nicht mehr leitend und nicht mehr funktionsfähig. **Varistoren altern** also: je häufiger sie ansprechen, desto weniger Körnchen verbleiben für eine ordnungsgemäße Funktion. Varistoren sind ideal für den Anschluss an einer Speisespannung um gefährliche, aber selten auftretende Überspannungen abzuleiten. Sie sind eher nicht für eine Beschaltung der Last einer H-Brücke geeignet, denn i.d.R. wird eine Last mittels der H-Brücke ja oft und regelmäßig geschaltet. Das Mittel der Wahl sind hier leistungsfähige bidirektionale Supressordioden.

Tipps für die Zuleitungen / Lastleitungen / Kondensator

Versäumen Sie bitte nicht, den Exkurs auf Seite 27ff bzgl. der Themen

- Überspannung durch induktive Last
- Parasitäre Induktion auf der Lastleitung
- Parasitäre Induktion auf der Spannungsversorgungsleitung

zu lesen.

Wenn Ihnen die Themen geläufig sind, hier trotzdem als Erinnerung: achten Sie bitte beim Anschluss der H-Brücke auf folgendes:

- Für den Anschluss der Spannungsversorgung und der Last nutzen Sie bitte nur eine Doppelleitung (also ein Kabel, bei dem beide Leitungen nebeneinander parallel laufen) oder –wenn Sie lediglich Einzelleitungen zur Verfügung haben– verdrehen Sie beide Leitungen über die gesamte Länge.
- Fügen Sie bei größeren Lasten und speziell bei deren Betrieb mit PWM einen großen Elektrolytkondensator (ab $1.000\mu\text{F}$ – siehe auch unten) direkt am Eingang der H-Brücke hinzu. Dies entlastet auch das Netzteil. Speziell die Regelung innerhalb von Schaltnetzteilen kann sehr unwillig reagieren, wenn eine hohe Last unter PWM anliegt: sie können nicht so schnell ausregeln und die Spannung wird instabil.
- Fügen Sie eine Supressordiode direkt am Spannungseingang der H-Brücke hinzu.

Hilfe für die Auswahl der Kondensatorgröße:

Zur Erinnerung: $1\text{F} = 1\text{As} / 1\text{V}$. Das bedeutet: die Spannung in einem geladenen Kondensator der Kapazität 1 Farad fällt bei einem konstanten Entladestrom von 1 Ampere in 1 Sekunde um 1 Volt ab. Angenommen, Sie möchten bei 5KHz PWM ($0,2\text{ms}$) und Taktverhältnis $50/50$ (also $0,1\text{ms}$) ein Absacken der Spannung um max. 2 Volt erlauben, dann ist mit $1.000\mu\text{F}$ Kapazität ein Strom von 20A möglich. Wenn wir von Peaks von 50A (z.B. Motoranlaufstrom) und z.B. von einem PWM Taktverhältnis von $90/10$ ($=0,18\text{ms}$) ausgehen müssen, dann sind mindestens $4.500\mu\text{F}$ notwendig. Ein Wert von $6.800\mu\text{F}$ oder $10.000\mu\text{F}$ schadet also nicht und ermöglicht i.d.R. gute Sicherheitsreserven.

Wichtig: achten Sie bei der Kondensatorauswahl auf den erlaubten Ripple-Strom. Gelegentliche Überschreitungen sind kein Problem (z.B. seltener Motorstart = hoher Peak-Strombedarf), dauerhafte Überschreitungen werden jedoch zu Lasten der Lebensdauer des Kondensators gehen. Dann schalten Sie im Zweifel lieber mehrere Kondensatoren mit jeweils kleinerer Kapazität parallel, um die zu erwartenden Peak-Ströme zwischen den Kondensatoren aufteilen zu können.

Achten Sie auf einen niedrigen ESR (um die Kondensatorerwärmung zu verringern) und verbauen Sie 105°C Typen mit hoher Lebensdauer (siehe Datenblatt des Kondensators), wenn Sie höhere Umgebungstemperaturen erwarten. Im Bedarfsfall können wir für Ihren Anwendungsfall gut geeignete Kondensatoren auswählen und beschaffen.

Fehlermeldung Kurzschluss - Abhilfen:

Zum Schutz der MOSFETs beinhaltet das Modul eine Kurzschlusserkennung und schaltet bei Erkennen eines solchen ab. Hierbei werden die Fälle

- Kurzschluss der Motorwicklung
- Kurzschluss gegen Masse und
- Kurzschluss gegen Vcc erkannt.

Tritt dieser Fehler im Betrieb gehäuft auf, obwohl kein Kurzschluss vorhanden ist, dann gibt es verschiedene Vorgehensweisen. Bevor Sie zu viel Zeit mit Experimentieren verwenden, würden wir für einen ersten Versuch Vorschlag 2 empfehlen.

1) Spannungsquelle prüfen

Achten Sie beim Anschluss einer Spannungsquelle darauf, dass diese auch genügend Strom liefern kann. Ein Motor, mit einem Anlaufstrom mit z.B. 10A kann evtl. NICHT durch ein 5A Netzteil betrieben werden, auch wenn er nach dem Anlaufen nur noch 1A benötigt. Der Grund: Die Spannung des Netzteils bricht beim Anlaufen des Motors ein und das Board interpretiert dies als Kurzschluss – und meldet dies über die beiden Fehlerleitungen. Verwenden Sie in diesem Fall entweder eine stärkere Stromquelle (z.B. ein Akku) oder puffern Sie die Eingangsspannung mittels eines Kondensators (siehe nächster Absatz).

2) Hinzufügung eines größeren Eingangskondensators zur Pufferung

Fügen Sie direkt an der H-Brücke an die Versorgungsspannung (V+/GND) einen größeren Elektrolytkondensator ein, der die notwendige Energiespitze beim Anlauf der Last bereitstellt. Die notwendige Größe muss je nach Last experimentell ermittelt werden. 1.000 μ F hat sich für mittlere Anlaufströme als durchaus ausreichend erwiesen; eine größere Kapazität wie z.B. 4.700 μ F ist u.U. hilfreich (siehe auch die vorhergehende Seite 16). Achten Sie auf einen niedrigen ESR und verbauen Sie 105°C Typen mit hoher Lebensdauer (siehe Datenblatt des Kondensators), wenn Sie höhere Umgebungstemperaturen erwarten. Im Zweifel können wir für Ihren Anwendungsfall gut geeignete Kondensatoren auswählen und beschaffen.

3) Einfügen eines Lastwiderstands

Das Anfahren von Motoren mit sehr hoher Leistung wird u.U. beim Motorstart wg. des niedrigen Innenwiderstands als Kurzschluss interpretiert. Hier hilft es dann oft nur, in die Motorleitung noch einen 0,1 Ohm bis 1 Ohm Lastwiderstand (der korrekte Wert muss experimentell ermittelt werden) einzuschleifen.

Die MOSFETs erlauben zwar einen kurzzeitigen Strom von 140/170A, der Brückenchip schaltet jedoch bei solchen Strömen in die Kurzschlussabschaltung. Hier ist es dann notwendig, mittels eines kleinen in Reihe geschalteten Lastwiderstands eine Strombegrenzung zu realisieren.

Alternativ zu einem Lastwiderstand könnte die Nutzung eines Heißleiters (NTC) als Einschaltstrombegrenzer sinnvoll sein. Ein solcher zeigt in kaltem Zustand einen höheren Widerstand als bei Erwärmung (z.B. 0,5 Ohm bei Raumtemperatur, 0,05 Ohm bei 15A Strom). Allerdings ist dann durch die notwendige Abkühlzeit (in erwärmten Zustand findet keine Strombegrenzung statt) ein Betrieb mit sehr häufigen Ein-Ausschaltperioden wegen der fehlenden Abkühlphase nicht möglich.

Tipp: Bei uns im Internetshop erhalten Sie günstige 1 Ohm Lastwiderstände im Metallgehäuse mit einer Belastbarkeit von 50W. Wenn Sie hiervon zwei Stück erwerben, können Sie durch Parallel- oder Reihenschaltung Widerstände von 0,5 bis 2 Ohm erreichen, bei drei Stück 0,33 Ohm bis 3 Ohm.



Damit können Sie anfangs experimentieren. Wenn Sie als Schutz für die ersten Experimente 2 oder 3 Ohm in die Lastleitung mit einschleifen, dann schützen Sie damit auch die H-Brücke vor Überlastung. Im Zuge der Tests können Sie die Widerstände dann verkleinern oder auch komplett weglassen. Gerade bei hohen Lastströmen raten wir für die ersten Tests dringend zu einem Lastwiderstand als Schutz.

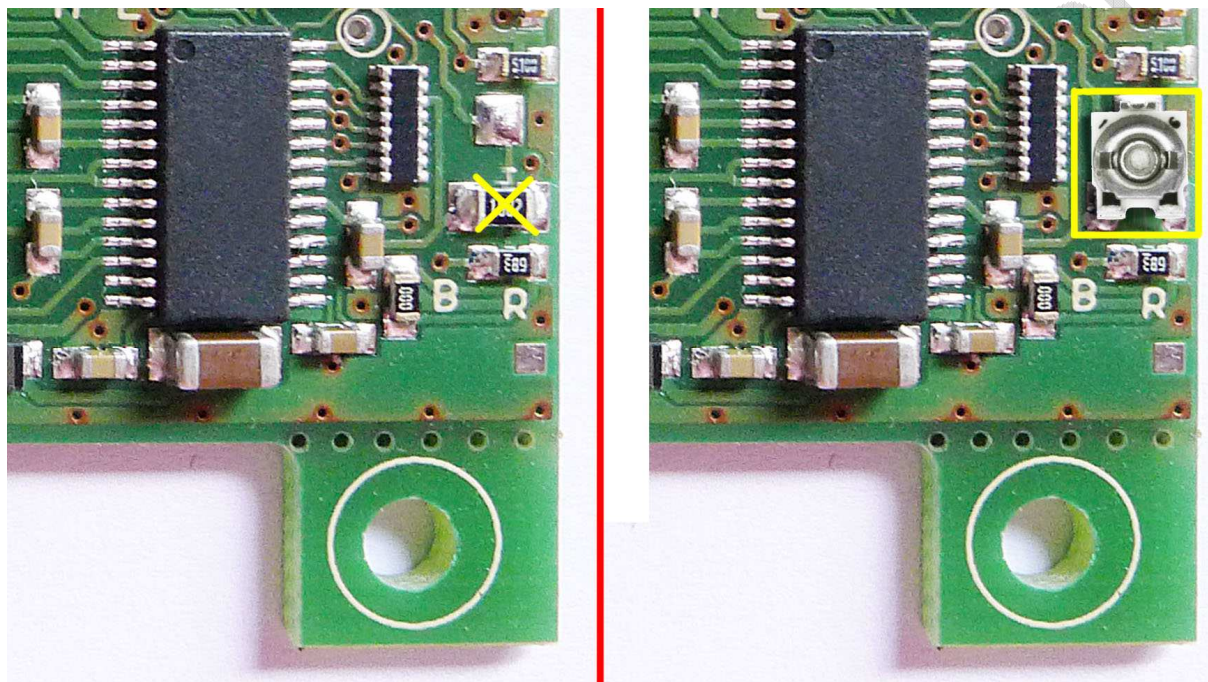
Zudem können Sie über den Widerstand die dort abfallende Spannung mit einem Oszilloskop messen und somit die fließenden Ströme berechnen. Nur mit einem Oszilloskop können Sie die Einschaltströme messen, die ja u.U. nur wenige ms lang auftreten, aber durchaus sehr hoch sein können. Der Widerstand begrenzt diese Einschaltströme auf einen ungefährlichen Wert, bewirkt aber trotzdem nur einen geringen Leistungsverlust.

4) Modifikation der Kurzschlusserkennung

Anhand eines Spannungsteilers wird die Ansprechschwelle der Kurzschlussicherung eingestellt. Um die Sensitivität der Kurzschlusserkennung zu modifizieren, müssen Sie das Widerstandsverhältnis des Spannungsteilers modifizieren oder alternativ die Kurzschlusserkennung komplett abschalten. Das Board ist für beide Fälle vorbereitet.

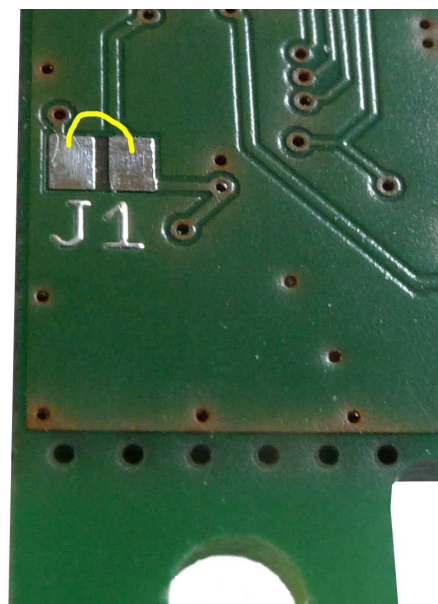
Einstellbare Kurzschlusserkennung:

Löten Sie den vorhandenen 10K Widerstand aus (links im Bild) und ersetzen diesen durch einen 10K Poti (rechts im Bild). Dann lässt sich das Ansprechen der Kurzschlusserkennung mittels des Potentiometers zwischen 0 und 128 Ampere einstellen (Mittelstellung ca. 64A).



Abschaltung der Kurzschlusserkennung:

Auf der Unterseite der Platine finden Sie einen Löt-Jumper, der mit J1 gekennzeichnet ist. Überbrücken Sie die beiden Lötfelder mit einem Tropfen Lötzinn. Diese Variante bietet sich als Kompromiss auch dann an, wenn die H-Brücke wegen einbrechender Spannung (unzureichende Spannungsversorgung, zu geringer Kabelquerschnitt) fälschlicherweise einen Kurzschluss (vor allem beim Start der Last – siehe vorherige Seite) erkennt.



Erwärmung / notwendige Kühlung

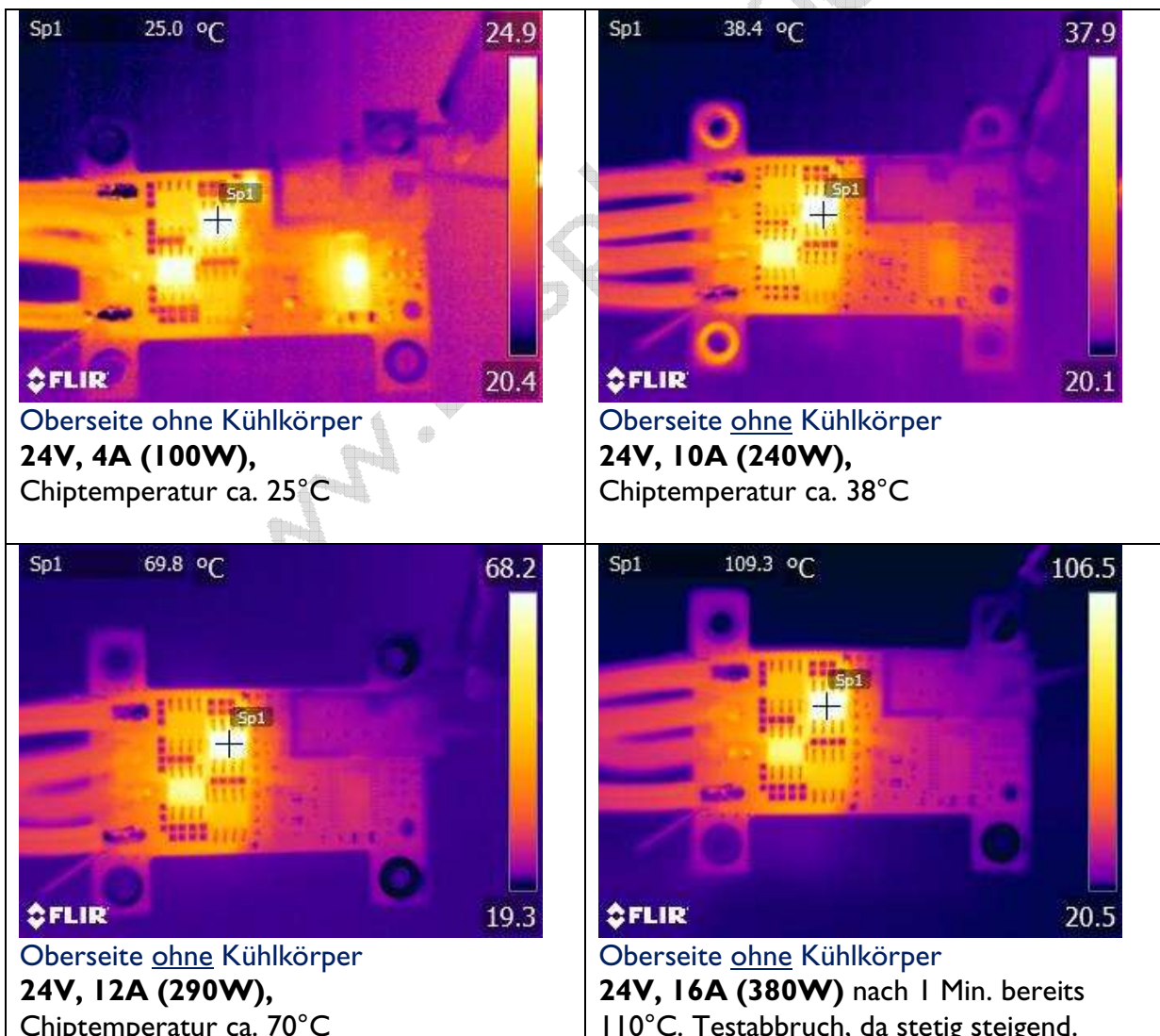
Erwärmung der MOSFETs

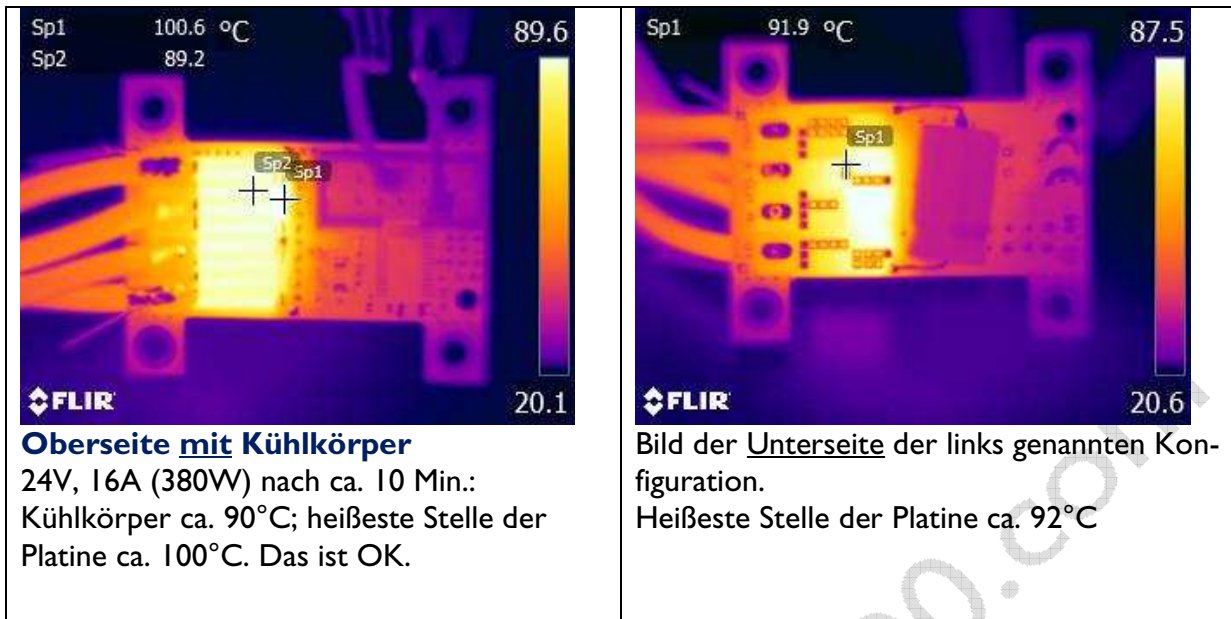
Die verwendeten MOSFETs haben einen sehr geringen Innenwiderstand von nur 5 Milliohm. Da immer zwei MOSFETs leitend sind, addiert sich der Innenwiderstand der H-Brücke somit auf 10 Milliohm. Bei angenommenen 24 Volt und 10 Ampere Strom (=240 Watt Last) fällt an der H-Brücke mit 10 mOhm Widerstand nur eine Spannung von ca. 0,1V ab. Dies entspricht bei 10A dann 1W Wärme.

Bei länger andauernden Lasten von über 300 Watt ist jedoch ein Kühlkörper und/oder eine aktive Kühlung notwendig.

Die folgenden Wärmebilder zeigen das Verhalten der H-Brücke bei Dauerlast. Interessant auch: die Temperatur der angelöteten Anschlussleitungen links. Trotz 2,5mm² Leitungen erreichen diese ca. 45°C. bei 380 Watt Dauerlast.

Anmerkung: Die Bilder zeigen eine andere Platinenversion, der Lastbereich (also die Mosfets) sind jedoch identisch, daher gilt das gezeigte genauso für die Optokoppler H-Brücke.





[Hinweis zum besseren Verständnis der obenstehenden Bilder](#)

Die gezeigten Wärmebilder von einer Flir E60 Wärmebildkamera sind mit automatischer Skalierung versehen, d.h. der kälteste Bereich wird automatisch immer dunkelblau und der wärmste Bereich hellgelb dargestellt – d.h. jedes Bild hat eine individuelle Skalierung. Vergleicht man z.B. das erste mit dem letzten Bild, so sieht auf den ersten Blick die Temperatur bzw. die Temperaturverteilung bei beiden ähnlich aus, während die Umgebungstemperatur bei ca. 20°C bleibt, beträgt jedoch der wärmste Bereich (=gelb angezeigt) beim ersten Bild nur rund 25°C; beim letzten Bild jedoch bei gleicher Farbe rund 90°C.

Zur Vereinfachung haben wir jeweils ein oder zwei Spots gesetzt (Sp1/Sp2), deren Temperaturmessungen am oberen Bildrand eingeblendet werden.

Erwärmung der Leiterbahnen

Eine Erwärmung findet allerdings nicht nur durch den Innenwiderstand der Mosfets statt. Auch die Leiterbahnen haben einen definierten Widerstand und erwärmen sich daher bei hohen Strömen natürlich ebenfalls. Da die Platine auf kleine Maße hin konzipiert wurde, wurden auch die Hochstromleiterbahnen soweit wie möglich reduziert. Dies führt als Kompromiss jedoch zu einer stärkeren Erwärmung der Leiterbahnen. Die Auslegung der Leiterbahnen orientiert sich am maximal möglichen Dauerstrom der H-Brücke. Rechnen Sie bei 18 Ampere Dauerlast (und 24V Betriebsspannung) mit einer Erwärmung der Leiterbahnen gegenüber der Umgebungstemperatur um ca. 40°C.

Kühlung / Einbau in ein Gehäuse

Denken Sie beim Verbauen der H-Brücke bitte immer daran, dass eine Erwärmung von z.B. 40° über der Umgebungstemperatur bedeutet: auf dem Labortisch erhalten Sie bei 25° Umgebungstemperatur 65°. Wenn Sie das Modul jedoch in ein Gehäuse oder Gerät verbauen, so steigt die Umgebungstemperatur durch die Erwärmung an. Da ΔT jedoch weiterhin 40°C beträgt, würde sich das Modul bei einer Umgebungstemperatur von 35°C bereits auf 75°C erwärmen – daher steigt die Umgebungstemperatur noch weiter und das Modul wird noch wärmer solange bis es abschaltet oder beschädigt wird. Achten Sie also bitte immer darauf, dass die erzeugte Wärme auch abgeführt werden kann (Kühlkörper nach außen hin, Belüftung; evtl. Ventilator). Im Zweifel testen/vermessen Sie Ihre Lösung im Dauerbetrieb.

Kühlkörper Form / Farbe

Der optional, von uns (wenn bestellt) aufgebrachte schwarze Kühlkörper hat eine Größe von ca. 20x10x5mm und besitzt einen Wärmewiderstand von 35 K/W. Größere Kühlkörper wären natürlich besser, sind jedoch nicht immer sinnvoll zu verbauen. Hier sollten Sie je nach Einbausituation (Gehäuse, verwendete Stecker etc.) und Wärmeentwicklung einen größeren Kühlkörper verwenden. Sie können den vorhandenen Kühlkörper (sofern mitbestellt) mit etwas Kraft (z.B. einer Zange) von den Mosfets lösen und gegen einen größeren/höheren tauschen. Evtl. Klebereste lassen sich von der Mosfet-Oberfläche mit etwas Schmirgelpapier leicht beseitigen.

Je geringer der Wärmewiderstand des neuen Kühlkörpers und je höher der Luftaustausch desto besser – ideal wäre bei sehr hoher Wärmebelastung ein Ventilator zum schnellen Wärmeaustausch. Sofern Sie eine forcierte Kühlung durch einen Luftstrom (z.B. Ventilator) vorsehen, können Sie auch einen nicht-eloxierten (i.d.R. silbernen) Kühlkörper nutzen. Ansonsten empfehlen wir einen schwarz eloxierten Typ.

Exkurs: Eine Eloxalbehandlung ist bei natürlicher Konvektion von Vorteil. Ein schwarzer Körper emittiert (und absorbiert) Wärmestrahlung besser als ein heller oder silberner Körper. Durch die Erhöhung des Strahlungsanteils bei der Wärmeabfuhr ergeben sich Verbesserungen der Gesamtkühlleistung zwischen 5 und 10% bei einem schwarzen Kühlkörper. Bei einer Kühlung per Luftstrom überwiegt dagegen der Konvektionsanteil den Strahlungsanteil bei weitem. Hier kann dann auf eine eloxierte Oberfläche verzichtet werden.

Parallelschaltung von H-Brücken

Grundsätzlich können Sie zur Erhöhung der Leistung oder zum Erreichen einer geringeren Mosfet-Temperatur auch zwei oder mehrere identische H-Brücken parallel schalten. Diese Aussage gilt jedoch nur für unsere direkt angesteuerte H-Brücke ohne Optokoppler. Bei der Brücke mit Optokopplern gibt es zwischen den einzelnen Optokopplern der parallel zu schaltenden Brücken zu viel Streuung beim Timing, so dass hier unserer Meinung nach keine Parallelschaltung empfehlenswert ist.

Sollte eine Parallelschaltung für Sie notwendig sein, empfehlen wir den Erwerb unserer Brücken ohne Optokoppler. Wenn eine galvanische Trennung erwünscht ist, schalten Sie dann vor die Logikeingangssignale selber einen externen Optokoppler und führen das Signal dann vom Optokoppler zu den parallelgeschalteten Brücken.

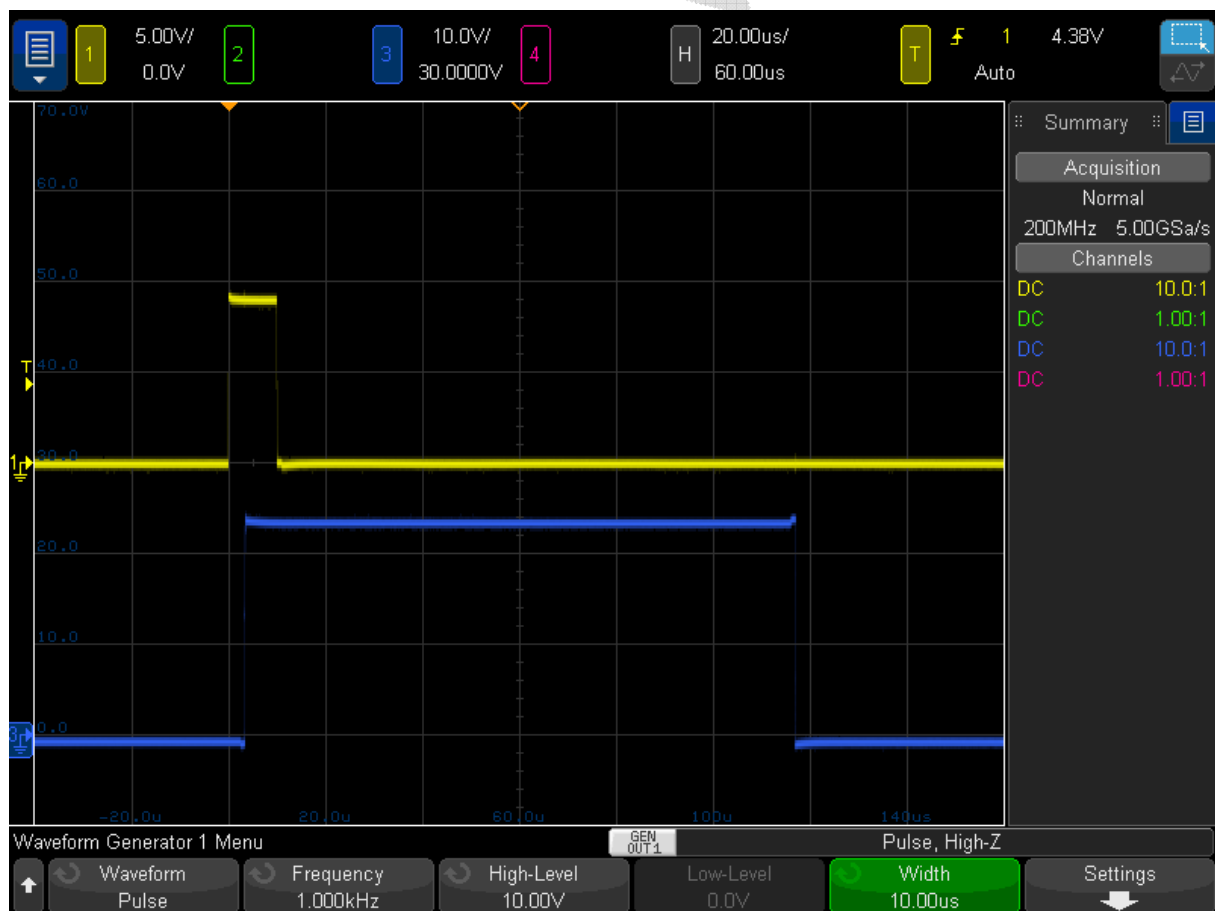
PWM Frequenz

Die PWM Frequenz bei diesem Modell darf ca. 1 KHz betragen, wenn das Tastverhältnis etwas gleich bleiben soll (ca. 50:50). Höhere PWM Frequenzen sind möglich, allerdings verschiebt sich durch die Optokoppler das Eingangs- zum Ausgangssignal am Optokopplerausgang, so dass sie nicht mehr beliebige Tastverhältnisse nutzen können. Diese Veränderung des Tastverhältnisses müssen Sie dann in Ihrer Software berücksichtigen!

Benötigen Sie grundsätzlich eine höhere PWM Frequenz, empfehlen wir unsere H-Brücke ohne Optokoppler, welche bis 40kHz erlaubt.

Wichtiger Hinweis: Die max. mögliche Frequenz möchten wir grundsätzlich erhöhen. Es ist daher nicht auszuschließen, dass wir die Auswahl der Optokoppler in einer zukünftigen Versionsüberarbeitung der Brücke ändern. Sofern Sie die Tastverhältnisverschiebungen in Ihrer Software berücksichtigen möchten, informieren Sie uns bitte bei der Nachbestellung bzw. informieren sich vorher bei uns, ob es eine Änderung gab.

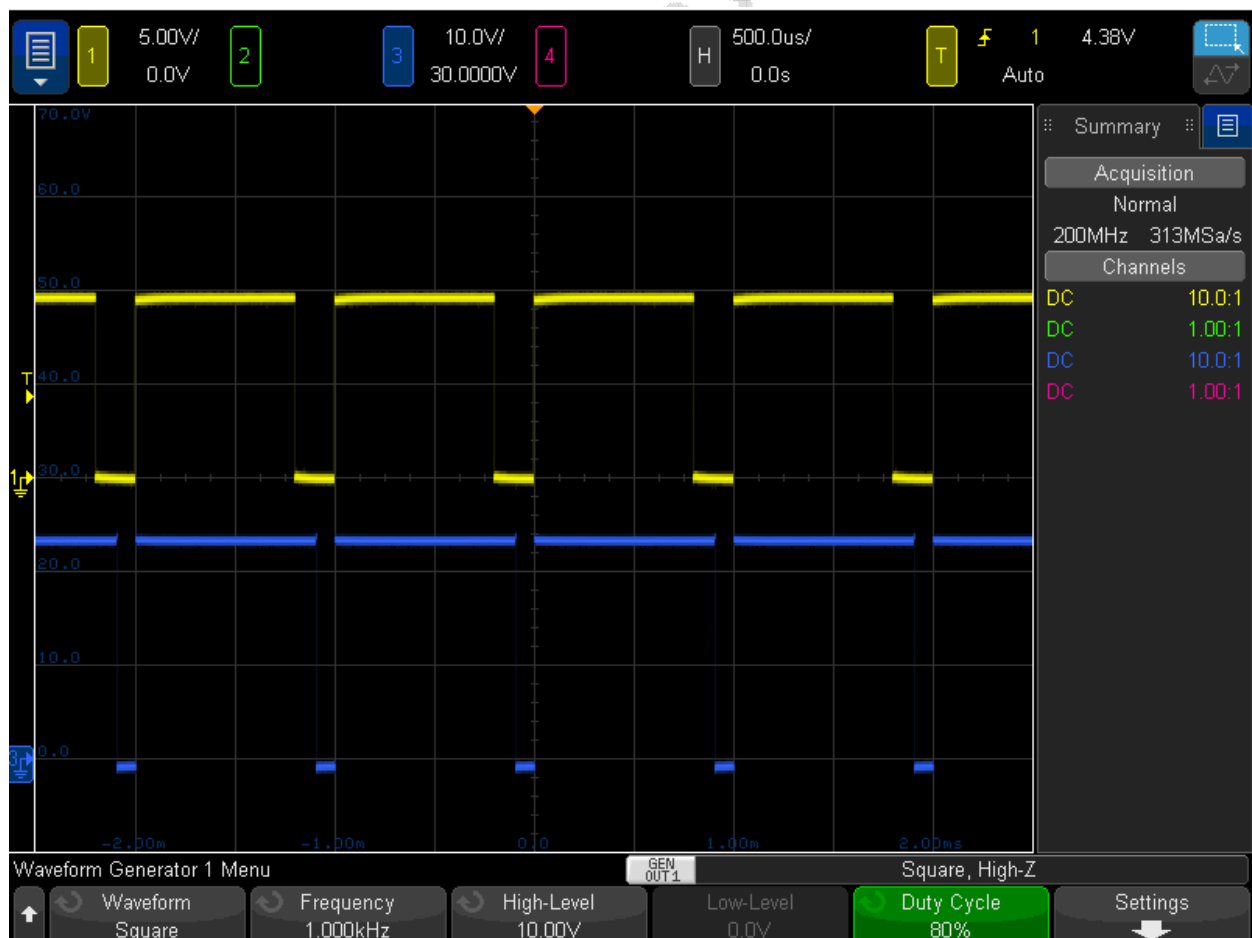
Das folgende Bild zeigt (Gelb: Signaleingang Optokoppler; Blau: Ausgang der H-Brücke), dass die steigende PWM-Flanke gegenüber dem Ausgang um ca. 4µS verzögert wird, die fallende Flanke sogar um 100µS verlängert wird. Daraus ergibt sich, dass das Ausgangs-Tastverhältnis nicht exakt dem Eingangs-Tastverhältnis entspricht und die Abweichung proportional mit steigender Eingangsfrequenz größer wird. Die Tabelle auf der nächsten Seite zeigt Eingangs- / Ausgang-Tastverhältnisse bei Frequenzen zwischen 100 Hz und 4 KHz.



Nachfolgend erhalten Sie eine kurze tabellarische Übersicht. Man erkennt, dass sich pro 500 Hz steigender PWM Frequenz, das mögliche Tastverhältnis um ca. 5% verringert.

PWM Frequenz	PWM Tastverhältnis 25%		PWM Tastverhältnis 50%	
	Eingang Optokoppler	Ausgang der H-Brücke (Last)	Eingang Optokoppler	Ausgang der H-Brücke (Last)
100 Hz	25%	25%	50%	51%
500 Hz	25%	30%	50%	55%
1000 Hz	25%	35%	50%	60%
1500 Hz	25%	40%	50%	65%
2000 Hz	25%	45%	50%	70%
2500 Hz	25%	50%	50%	75%
3000 Hz	25%	55%	50%	80%
3500 Hz	25%	60%	50%	85%
4000 Hz	25%	65%	50%	90%

Beispiel: 1000 Hz bedeuten demnach ca. +10% Ausgangstastverhältnis gegenüber dem Eingangstastverhältnis. Bei 80% Eingang wären also 90% beim Ausgang zu erwarten. Unten sehen Sie das Oszilloskop-Bildschirmfoto von der Kontrolle am Objekt: Eingang (gelb) 1000 Hz, 80%. Der Ausgang (blau) zeigt tatsächlich ein Tastverhältnis von: 90%:



Technische Daten H-Brücke Opto VI:

Artikel H-Brücke Opto VI:

Maße:	45 x 38 mm (45 x 22mm ohne Montageohren) ca. 3,5 mm hoch
Gewicht:	ca. 7 Gramm ohne Stecker
Spannung Logiksignale:	High: 1,8 Volt bis 30 Volt Low: 0 bis 0,5 Volt
Anzahl Motorkanäle:	1 (Vollbrücke)
Max. PWM Frequenz:	typ. 1 KHz* max. 5 KHz* *= bitte frequenzabhängige Tastverhältnisverschiebung beachten (siehe Seite 24)
Eigenverbrauch des Moduls:	typ. 8mA, max. 15mA; 10µA im Sleep Mode
Versorgungsspannung Motor:	5,5 Volt bis 26 Volt Gleichstrom
Max. Dauerstrom Motor:	18 A bei Kühlung über Lüfter oder Kühlkörper 12 A ohne Kühlung bei 25° Umgebungstemp. Kurzzeitig (Impuls): 140A
Innenwiderstand MOSFETs:	5,0 mOhm

Exkurs Einschaltströme

Je nach verwendetem Verbraucher unterschalten sich die Nennströme (Betriebsströme) erheblich von den Einschaltströmen.

Glühwendel von **Glühlampen** haben im kalten Zustand einen erheblich niedrigeren Widerstand als im warmen/heißen Zustand. Der Einschaltstrom kann durchaus das 15- bis 20-fache des normalen Betriebsstroms betragen. D.h. eine 12V, 50W Lampe (=ca. 4A Nennstrom) kann im Moment des Einschaltens durchaus einen Strombedarf von 60A oder mehr haben. Mit zunehmender Erwärmung der Glühwendel (=glühen) steigt deren Innenwiderstand an. Wenn Glühlampen oft geschaltet werden sollen (Beispiel Bühnenbeleuchtung, Lichtorgel) ist es sinnvoll, sie per PWM in einem (leicht) gedimmten Zustand dauerhaft anzusteuern. Man wählt dabei eine Modulation (z.B. 5%), die Lampe scheinbar noch ausgeschaltet erscheinen lässt, sie jedoch bereits spürbar erwärmt. Dadurch sinkt der Einschaltstrom auf ca. das 2-fache des Nennstroms, gleichzeitig wird die Lebensdauer der Glühlampe massiv verlängert, da die Glühwendel vor allem durch das Einschalten im kalten Zustand verschleißt.

Die Einschaltströme, auch Anlaufströme genannt von **Gleichstrommotoren** sind ebenfalls wesentlich höher, da der Motor während der Anlaufphase (also der Phase, in der die Masse beschleunigt werden muss) ein wesentlich höhere Leistung aufbringen muss, folglich also mehr Strom benötigt. Der benötigte Anlaufstrom kann grob aus Spannung dividiert durch Innenwiderstand des Motors berechnet werden. Der Nennstrom des Motors ist dann abhängig von der Last nach der Beschleunigung. Mittels Pulsweitenmodulation (PWM) kann zwar ein Sanftanlauf des Motors erreicht werden: die Dauer der einzelnen Stromspitzen verändert sich zwar durch PWM, jedoch bleibt die Höhe identisch, d.h. der Peak-Strombedarf wird durch PWM nicht reduziert.

Der Einschaltstrom „normaler“ **Induktivitäten** wie Relais oder Elektromagneten ist bei Gleichspannung üblicherweise sogar geringer als der Nennstrom im Betrieb. Die induzierte Gegenspannung wirkt der angelegten Gleichspannung entgegen und sorgt für einen langsamen Anstieg des Stroms. Dieser Stromanstieg bis zum Maximum kann je nach Größe der Induktivität mehrere Sekunden dauern.

Exkurs: induzierte Überspannung / Selbstinduktion / parasitäre Induktion

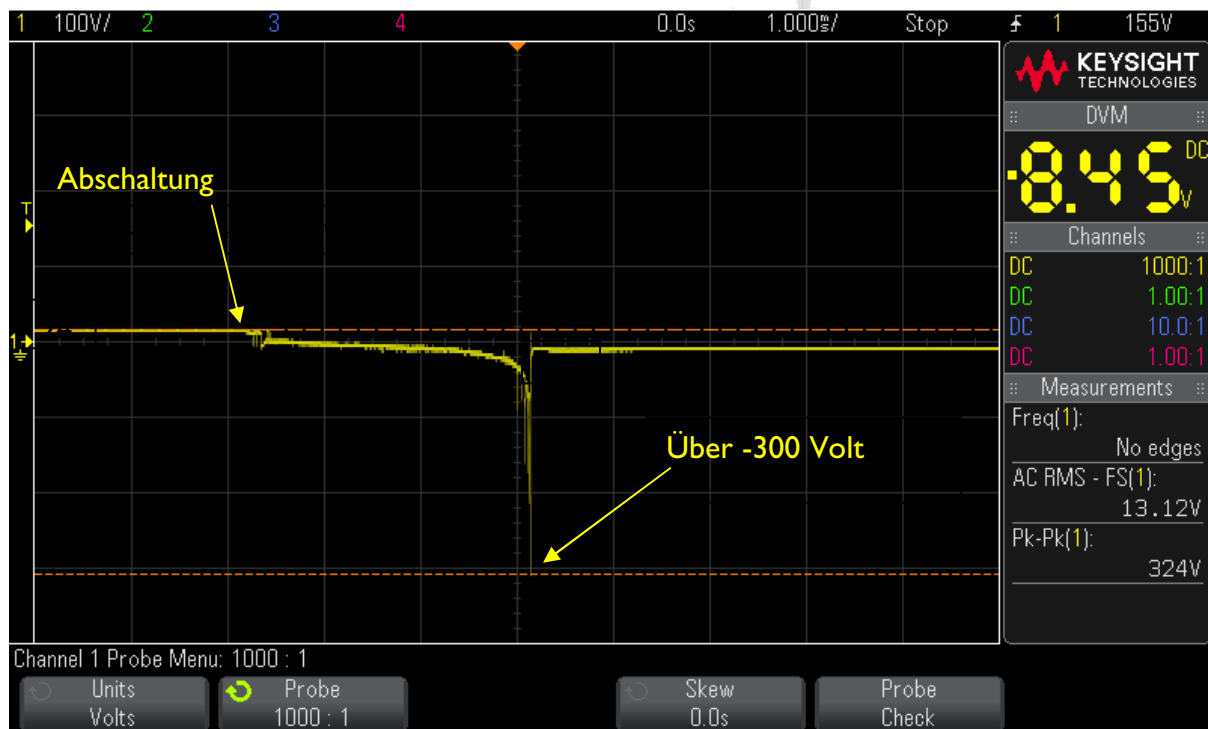
Es gibt (neben Überlastung/Überhitzung) drei typische Fälle, bei denen die H-Brücke beim Kunden beschädigt wird. Alle drei Fälle sind gekennzeichnet durch Induktivität erzeugte Überspannungen.

Fall 1 (Überspannung auf der Lastleitung durch die induktive Last)

Jede induktive Last (Motoren, Elektromagnete etc.) produziert bei Abschaltung der Spannung eine der bisherigen Spannung entgegengesetzte Selbstinduktionsspannung durch den Abfall des Magnetfeldes. Diese Spannung kann schnell das 10- oder 20-fache der angelegten Spannung betragen. Bei 24V Eingangsspannung kann die Selbstinduktionsspannung also durchaus bis zu 500 Volt betragen.

Diese Spannung wird der H-Brücke zugeführt und MUSS abgebaut werden, bevor sie die MOSFETs erreicht, denn sie würden diese sofort zerstören.

Das folgende Bild zeigt die Spannung eines kleinen! Elektromagneten, dessen 24V Betriebsspannung abgeschaltet wurde: die Selbstinduktionsspannung erreicht binnen 3ms -300 Volt!



Um die H-Brücke vor solchen Überspannungen zu schützen, haben wir sie bereits mit einer bidirektionalen Supressordiode auf der Lastleitung ausgestattet. Diese wird ab 26V leitend und schließt dann die Motorleitung (mit fallendem Widerstand bei steigender Spannung) kurz. Sie schützt somit die H-Brücke vor Zerstörung, denn die Selbstinduktionsspannung wird somit während des Entstehens bereits ab 26V kurzgeschlossen und somit abgebaut.

Anmerkung: Innerhalb der Mosfets sind (parallel zu den Drain-Source-Strecken) noch Freilaufdioden mit einer kurzen Reverse Recovery Time (kürzer als die Rise Time der Transistoren). Diese Dioden können somit die entstehende Ströme in einer Off-Phase über Vcc und GND ableiten; aber die Erfahrung zeigt, dass eine Suppressordiode parallel zur Last eine sinnvolle Ergänzung ist, zumal diese nur für die Spannungsanteile oberhalb 26V aktiv wird. Zudem reagieren manche Netzteile unwillig auf zurückgeleitete hohe impulsartige Spannungen (speziell bei PWM).

Zur Erinnerung: Motor = Generator! Ein sich (noch) drehender Motor mit abgeschalteter Spannung am Eingang wird zum Generator, erzeugt also selber eine Spannung. Auch diese wird ab 26V von der Suppressordiode abgebaut und schützt also die H-Brücke auch vor solchen Spannungen, Spannungen unterhalb werden von den oben erwähnten integrierten Freilaufdioden an die DC Versorgung abgeleitet. Es ist aber grundsätzlich immer empfehlenswert ist, eine separate bidirektionale TVS bzw. Suppressordiode und/oder einen Varistor* direkt an die Last sowie aufgrund der parasitären Induktion der Zuleitung (siehe unten bei Fall 2) eine weitere direkt an Vcc/GND (H-Brücke) anzuschließen.

Fall 2 (Überspannung durch parasitäre Induktion auf der Lastleitung) & Fall 3 (Überspannung d. parasitäre Induktion auf der Versorgungsleitung)

Ströme fließen immer in einer Schleife (Hin- und Rückweg) und rufen dabei ein Magnetfeld hervor. Wenn sich der Strom ändert, ändert sich auch die Stärke des Magnetfeldes und es wird eine Induktionsspannung erzeugt. Das Faraday'sche Gesetz bestimmt die Höhe der erzeugten Spannung, die Formel dafür ist die Stromänderungsgeschwindigkeit di/dt multipliziert mit der Induktivität L . Letztere ist u.a. von der Geometrie der Leitung(en) abhängig. Je größer die aufgespannte Fläche des Hin- und Rückleiters, desto höher ist L . Somit ist einleuchtend: um die erzeugte Spannung so klein wie möglich zu halten, muss die Induktivität klein gehalten werden, denn an di/dt ist (oft) nichts zu ändern. Leiterschleifen sollten grundsätzlich so verlegt werden, dass ihre eingeschlossene Fläche so gering wie möglich wird. Das bedeutet in diesem Fall: Die Hin- und Rückleiter sollten über die ganze Strecke direkt nebeneinander verlaufen. Bei kleinen Strömen ist dies i.d.R. vernachlässigbar, aber bei Strömen von mehreren zig Ampere (z.B. Stromspitzen beim Start eines stillstehenden Motors) sieht das anders aus.

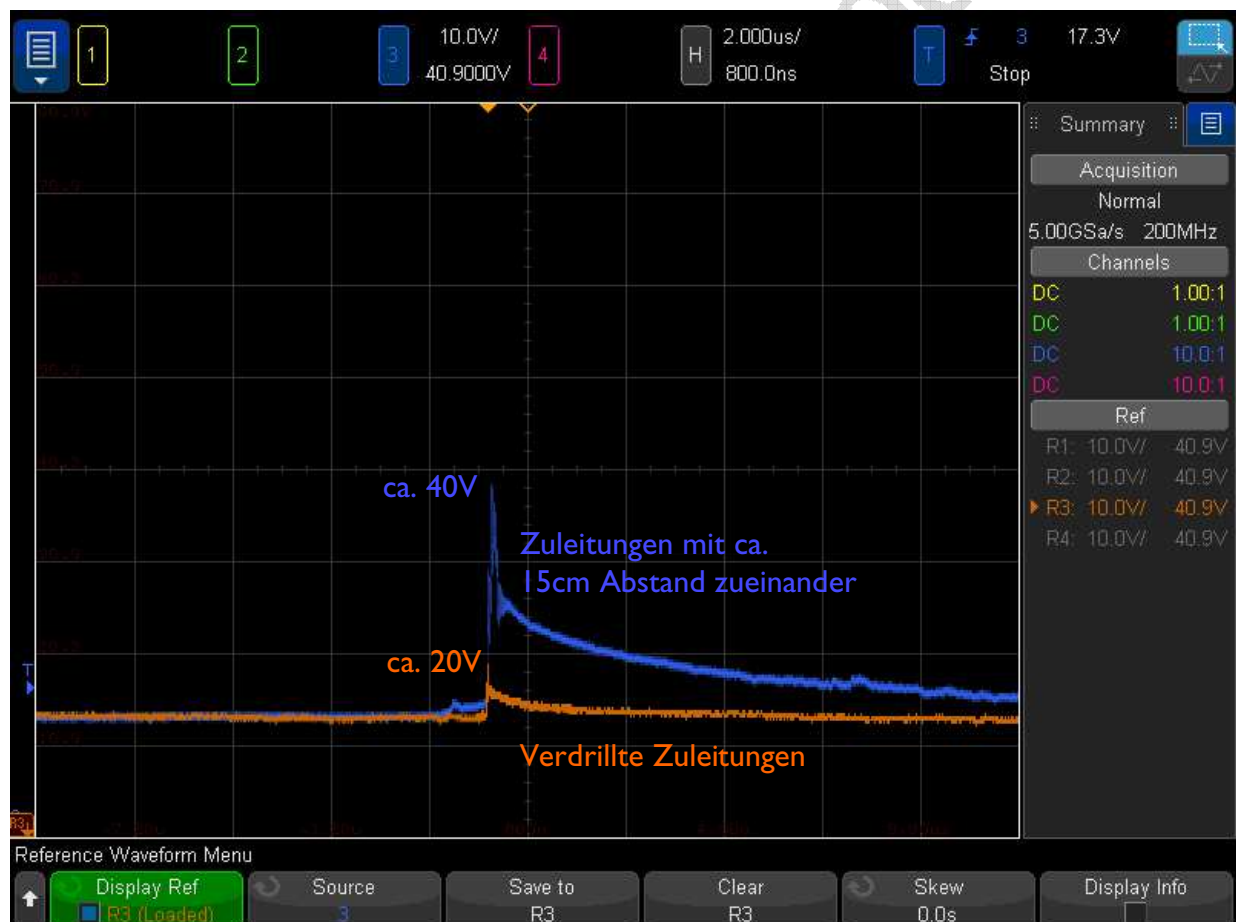
Die, besonders bei einer per PWM angesteuerten (auch ohmschen!) hohen Last wiederholt entstehenden steilen Flanken (hohes di , kurzes dt) sorgen zusammen mit der Induktivität der Leitungen für hohe Spannungsüberschwinger, die die maximale Sperrspannung der Bauteile um ein Vielfaches übersteigen und damit zerstören können.

Beispiel: Als Daumenregel kann man annehmen, dass eine Zwillingsleitung (Doppelleitung mit parallel verlegten Hin- und Rückleitern) je nach Dicke und Leiterabstand rund $0,5\text{-}1\ \mu\text{H}$ Leitungsinduktivität pro Meter besitzt. Mit größerer Länge und wachsendem Abstand der Leiter zueinander steigt die Induktivität an. Eine 1,50 Meter lange Leitung mit 20cm Abstand zwischen den beiden Leitern besitzt eine Leitungsinduktivität von über $3\ \mu\text{H}$. Bei angenommenen 30A Peaks und PWM Impulsen mit einer Anstiegszeit von 50ns (in Wirklichkeit vermutlich eher schneller) ergibt sich daraus bereits rechnerisch eine induzierte Spannung von fast 2000V. Verlaufen dagegen beide Leiter über den gesamten Weg direkt nebeneinander sinkt die induzierte Spannung auf 300V. In der Praxis sind diese Werte glücklicherweise geringer, da die Spannungsversorgung auf der einen Seite und der Elko auf der anderen Seite der Leitung diese Werte stark drücken. Trotzdem leuchtet sicher jedem ein, dass es sinnvoll ist, die Voraussetzungen für eine induzierte Spannung so wie möglich zu reduzieren.

Um dies zu verdeutlichen, zeigt das folgende Bild den Unterschied in der Praxis. Hier sind die zwei Leitungen einmal mit 15cm Abstand zueinander und einmal miteinander verdreht verlegt. Die Spannungsversorgung beträgt rund 16 Volt (unter Last etwas weniger), die Leitungen sind je 1,50 Meter lang, die Last misst 0,6 Ohm (hinzu kommen Leitungs- und Kontaktwiderstände); der gemessene Strom beträgt am Ende knapp 21A. Angeschlossen sind hier zur Demonstration lediglich Spannungsversorgung und Last, also keine H-Brücke.

Zur Aufzeichnung der blauen Kurve sind die Hin- und Rückleiter der Spannungsversorgung mit Abstand verlegt worden. Gemessen wird am Ende der Spannungsversorgungskabel (also an den Kontakten, die mit der Last verbunden werden). Der Triggerpunkt ist der Zeitpunkt der Lastabklemmung. Durch die parasitäre Induktion der Leitungen steigt die Spannung kurzzeitig auf fast 40V (zur Erinnerung: das ist 2,5x der Eingangsspannung).

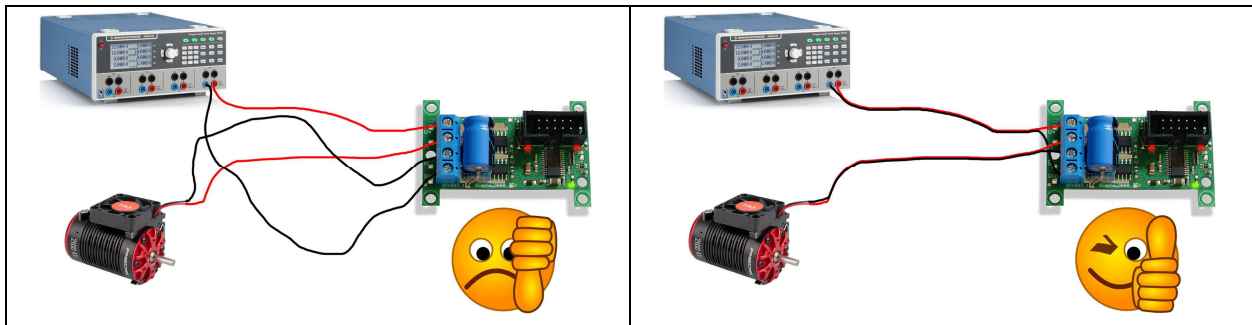
Die orangene Kurve zeigt exakt die gleiche Konfiguration, allerdings wurden hier die beiden Hin- und Rückleiter grob verdreht, so dass sie über die gesamte Länge möglichst nahe zusammen verlaufen, der Peak erreicht keine 20V, also lediglich 30% der Eingangsspannung.



Zwei Anmerkungen:

- 1) mit einem zusätzlichen Elko am Ende der Leitungen verschwindet dieser Effekt fast vollständig, allerdings belastet dies auf Dauer diesen Kondensator, weshalb eine zusätzliche Suppressordiode hilfreich ist. Je größer der Elko ist, desto weniger Ripple auf der Leitung.
- 2) Nicht nur beim Abschalten, sondern auch beim Zuschalten einer Last wirkt eine parasitäre Induktion.

Dies bedeutet für Sie: Hin- und Rückleitung sowohl für die Last als auch für die Spannungsversorgung sollten niemals durch einzelne lose ‚herumfliegende‘ Leiter, sondern durch ein zweiadriges und möglichst kurzes Kabel aufgebaut werden. Daraus ergibt sich auch, dass man es möglichst vermeidet, ein Gehäuse oder z.B. Kfz-Chassis als Rückleitung zu nutzen, auch wenn es praktisch wäre. Eine stromführende Leitung sollte sich also immer unmittelbar benachbart zur Rückleitung befinden. Haben sie Leitungen mit dem notwendigen Durchmesser nicht als Doppelleiter zur Verfügung, verdrehen Sie sie miteinander.



Für **Fall 2** (Lastleitung) ist beruhigend zu wissen: auch hier hilft die bei Fall 1 beschriebene Supressordiode in der Motorleitung.

Für **Fall 3** (Versorgungsleitung) ist jedoch wichtig zu wissen: **Die H-Brücke ist dagegen nicht geschützt. Hier müssen Sie Vorkehrungen treffen.** Zwar puffern die Elkos am Eingang der H-Brücke diese (zum Glück meist energiearmen) Spannungsspitzen ab (sie verhalten sich hier ähnlich einer Supressordiode), aber auf Dauer ist dies eine Belastung für die Elkos.

Sofern dieser Fall 3 bei Ihnen wg. sehr hoher Ströme und/oder Nutzung von PWM auftreten kann, empfehlen wir:

- Wie beschrieben: Hin- und Rückleitungen (VCC/GND) permanent parallel führen. Dies verringert die Induktivität L und somit dann auch die aus $L \cdot (di/dt)$ resultierenden Spannungsspitzen.
- Leitungslänge verringern (50% weniger Länge bedeutet 50% kleinere Induktivität)
- Führen Sie die Versorgungsleitung vom Netzteil/von der Batterie zuerst an einen separaten, nahe der H-Brücke montierten Elektrolytkondensator mit hoher Kapazität und erst von dort zur H-Brücke. Der Elko sollte eine passend hohe Kapazität aufweisen, um die Stromspitzen auf der Leitung glätten zu können und daher auch einen niedrigen ESR haben und einen hohen Welligkeitsstrom bei Hochfrequenz erlauben. Dies verringert di/dt und somit die induzierten Spannungsspitzen, des Weiteren werden auftretende Spannungsspitzen durch den Elko abgebaut bevor sie die H-Brücke erreichen.
- Anschluss einer bidirektionalen 24V Supressordiode parallel zum o.g. Kondensator um die Spannungsspitzen kurzzuschließen, bevor sie die H-Brücke schädigen können.

= Varistoren schließen Überspannungen ebenfalls kurz, sind jedoch aus Oxid aufgebaut. Einzelne Oxidkörner schließen ab einer bestimmten Spannung kurz und verbrennen dann. Sie sind dann nicht mehr leitend und nicht mehr funktionsfähig. **Varistoren altern also: je häufiger sie ansprechen, desto weniger Oxidkörner verbleiben für eine ordnungsgemäße Funktion. Varistoren sind ideal für den Anschluss an einer Speisespannung, um gefährliche, aber selten auftretende Überspannungen abzuleiten, sofern nicht der o.g. Fall 3 (PWM bei hohen Lasten) vorliegt. Sie sind definitiv nicht für eine Beschaltung der Last einer H-Brücke geeignet, denn i.d.R. wird eine Last mittels der H-Brücke ja oft und regelmäßig geschaltet. Das Mittel der Wahl sind hier leistungsfähige bidirektionale Supressordioden.*

Exkurs PWM

Die Pulsweitenmodulation (PWM) wird zur Informationsübertragung und zusätzlich häufig zur Steuerung der Energieumwandlung in einem technischen System eingesetzt.

Zuerst etwas (vereinfachte) Theorie:

Wenn Sie z.B. eine Leuchtdiode binnen 1 Sekunde 5 Mal für 0,1 Sekunden ausschalten und dann wieder für 0,1 Sekunden einschalten, sehen Sie zuerst einmal ein Flackern. Zudem war aber die LED die Hälfte der Zeit abgeschaltet und hat daher in der Gesamtzeit auch nur die Hälfte an Lichtenergie abgegeben (und auch nur in der Hälfte der Zeit Strom verbraucht).

Angenommen, Sie beschleunigen diese Rate auf eine Ein- und Ausschaltzeit von ca. 4ms (also über 120 Hz wie im Oszilloskopbild rechts oben), dann würden das Auge sicher kein Flackern oder Flimmern mehr registrieren – es würde jedoch eine Leuchtdiode sehen, die scheinbar nur mit halber Kraft leuchtet – kein Wunder, sie ist ja auch die Hälfte der Zeit (nämlich 122x pro Sekunde für 4ms abgeschaltet – und dann für 4ms eingeschaltet).

Wenn Sie nun das Verhältnis von 1:1 im obigen Beispiel ändern auf rund 1:10 (wie im Bild in der Mitte), dann würde die Helligkeit noch weiter abnehmen, denn die LED ist meistens abgeschaltet – im umgekehrten Fall, also wenn die LED länger ein- als ausgeschaltet wäre (siehe Bild unten), würde die Helligkeit zunehmen.

Beachten Sie, dass in allen diesen Bildern die Frequenz gleichbleibt, lediglich der Anteil Ein/Aus variiert.

Dies nennt man Pulsweitenmodulation (PWM): das Tastverhältnis variiert, die Frequenz bleibt die gleiche.

Durch das Verhältnis der Einschaltdauer zur Ausschaltdauer in einer definierten Zeit, kann die einem Verbraucher zugeführte Leistung gesteuert werden. In unserem Fall könnte also der Mikrocontroller mittels PWM, also der schnellen Steuerung der Ein- und Ausschaltzeiten, die Geschwindigkeit des Motors steuern.

Starten Sie nun noch nicht gleich mit der Erstellung eines Programms, welches diese gepulste Ausgabe realisiert! Fast jeder Mikrocontroller kann eine solche PWM-Ausgabe hardwareseitig quasi nebenbei erledigen – für PWM ist extra entsprechende Hardware inkludiert. Um diese zu nutzen, ist nicht viel Programmieraufwand notwendig, lediglich durch das Setzen einiger



Parameter wird der Pulsweitenmodulator gestartet; und durch Variation des genutzten Timers wird das Tastverhältnis von Eingeschaltet zu Ausgeschaltet verändert. Den Rest erledigt die Hardware quasi nebenbei – sie brauchen also in Ihrer Software keinerlei Ressourcen hierfür zur Verfügung stellen.

Beispiel in Bascom zur Veranschaulichung:

Die folgenden Zeilen starten PWM auf Port B.7 und fahren den Motor langsam von 0% auf 100% hoch um dann, nach 5 Sekunden Wartezeit, den Motor auf 50% Geschwindigkeit zu reduzieren. Dann endet das Programm. Preisfrage: Was passiert nach dem Ende des Programms mit dem Motor? Wird er abgeschaltet, läuft er weiter mit 50% oder wieder mit 100% Geschwindigkeit? Antwort auf der nächsten Seite.

```
` PWM Beispielcode (~100 Hz)

Config Timer1 = Pwm , Pwm = 8 , Compare C Pwm = Clear Up ,
                Compare C Pwm = Clear Down , Prescale = 256

For I = 0 To 255 Step 5
    Pwm1c = I
    Waitms 10
Next I

Waitms 500

For I = 255 To 130 Step -5
    Pwm1c = I
    Waitms 10
Next I

End
```

Zu kurzen Erläuterung: PortB.7 hängt an der Hardware für den PWM Kanal C. Mit *Pwm1c* wird das entsprechende Register mit dem gewünschten Wert beschrieben.

PWM Geschwindigkeit

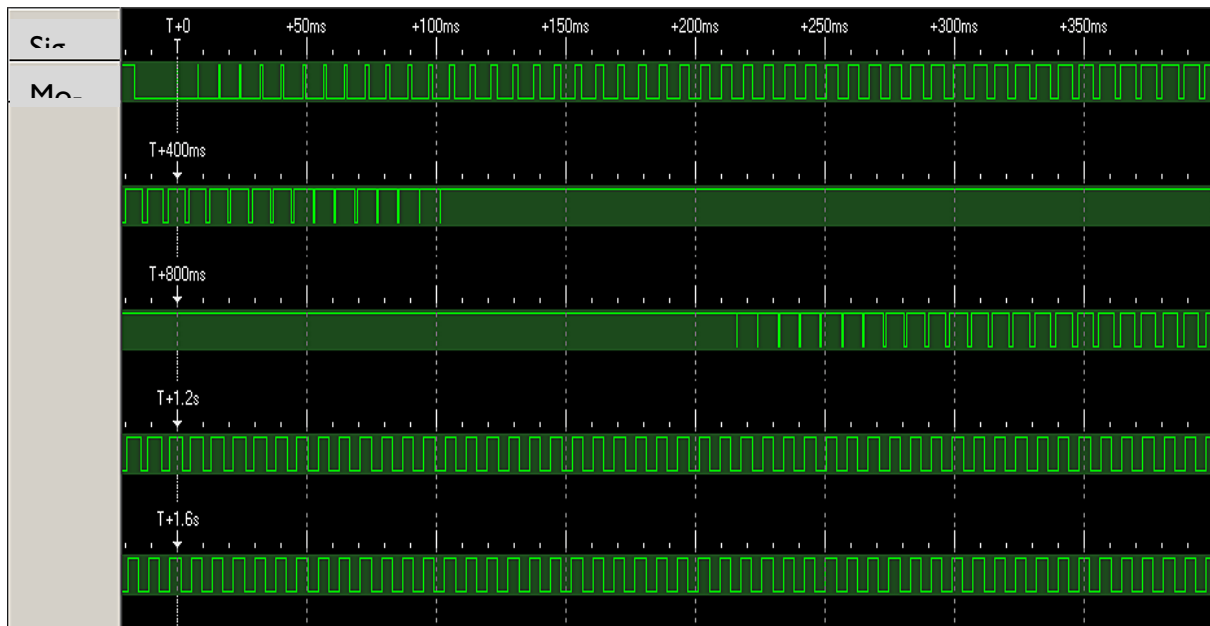
Zu langsame Geschwindigkeiten führen dazu, dass der Motor nicht rund läuft und man die Steuerung des Motors akustisch wahrnehmen kann.

Eine zu schnelle PWM Geschwindigkeit kann den Motor schädigen: Die Ummagnetisierungsverluste im Motor führen bei falscher PWM Frequenz dazu, dass die verbrauchte Energie nicht in Bewegung, sondern in Wärme umgesetzt wird. Diese Wärme sorgt mit der Zeit dazu, dass die Magnete Ihre magnetische Kraft verlieren (legen Sie einen Magneten auf die Herdplatte, ist er nach wenigen Minuten nicht mehr magnetisch) und somit der Motor für die gleiche Kraft an der Welle immer mehr Leistung verbrauchen muss.

Je nach Ausführung des Motors sind unterschiedliche PWM Frequenzen notwendig. Ein billig aufgebauter Motor sollte nicht mit mehr als 3-5 KHz betrieben werden. Hochwertigere Motoren mit Neodym Magneten und besseren Blechen sind besser mit bis zu 8-10 KHz zu betreiben und Brushless Motoren haben eine ideale Energieausbeute bei ca. 25 KHz.

Im Zweifelsfall müssen Sie durch eigene Tests eine optimale PWM Frequenz ermitteln.

Zur Verdeutlichung haben wir zeigen wir das Ausgangssignal des Mikrocontrollers noch mit einem Logikanalyzer aufgezeichnet. Die gesamte Aufzeichnung ist 2 Sekunden lang, in jeder Zeile sind 400ms abgebildet. Sehr schön ist zu erkennen, wie das Tastverhältnis von Ein zu Aus sich mit fortlaufender Zeit verändert.



Die ersten 510 ms werden benötigt, um die Geschwindigkeit in 51 Schritten von 0 auf 100% zu steigern – nach jedem Schritt folgt eine Wartezeit von 10 ms. Dann folgt eine Pause von 500ms (Waitms 500), in der der Motor mit voller Geschwindigkeit läuft. Dann wird er in 25 Schritten auf eine Geschwindigkeit von ca. 50% gefahren (dies wird bei 1,25 Sekunden erreicht) und das Programm dann beendet. Nun die Antwort auf unsere Frage von der vorhergehenden Seite: Sie erkennen, obwohl das Programm beendet wurde (ca. ab Position 1,25 Sek.), arbeitet der Mikrocontroller seinen PWM-Befehl weiterhin ab (=der Motor wird weiter in einem Tastverhältnis von 1:1 gepulst = 50% Geschwindigkeit) und verbraucht dabei keinerlei Ressourcen.

Errata:

keine

© www.Display3000.com

Haftung, EMV-Konformität

Wenn Sie diesen Bausatz fertig gestellt haben bzw. diese Baugruppe durch Erweiterung bzw. Gehäuseeinbau betriebsbereit gemacht haben, gelten Sie nach DIN VDE 0869 als Hersteller und sind verpflichtet, bei der Weitergabe des Gerätes alle Begleitpapiere mitzuliefern und auch Ihren Namen und Ihre Anschrift anzugeben.

Geräte, die aus Bausätzen selbst zusammengestellt werden, sind sicherheitstechnisch wie ein industrielles Produkt zu betrachten.

Derjenige, der den Bausatz zusammenbaut und in einem Gehäuse montiert, gilt als Hersteller und ist damit selbst für die Einhaltung der geltenden Sicherheits-, EMV- und Entsorgungsvorschriften verantwortlich.

Unsere EG Konformitätserklärung dieses Moduls kann vom Internet heruntergeladen werden oder wird Ihnen auf Nachfrage von uns zugesandt.

Für Schäden die durch fehlerhaften Aufbau entstanden sind, direkt oder indirekt, ist die Haftung generell ausgeschlossen.

Bei der Lieferung von Fremdprodukten als auch Software gelten über diese Bedingungen hinaus die besonderen Lizenz- oder sonstigen Bedingungen des Herstellers.