

# Eine elektronische Last mit MYC Protokoll

Author DK1RI, Version V02.3 20181022

This paper is published in <https://github.com/dk1ri> as well

## Einleitung

Dies ist die Beschreibung einer elektronischen Last für Gleichspannungen mit langsamer Änderung der Spannung.

Das Gerät wird mit dem MYC Protokoll über den I2C Bus oder RS232 /USB gesteuert.

## Sicherheitshinweis

*Dieses Gerät kann mit hohen Spannungen und hohen Temperaturen betrieben werden. Der Aufbau und die Bedienung dieses Gerätes ist nur durch ausreichend qualifiziertem Personal erlaubt. Due to possible high voltages and high temperature the usage of this device is allowed for qualified personal only.*

## Beschreibung

Die Schaltung besteht aus der Steuerungsplatine [1] und der äußeren Beschaltung mit den FETs und den Shuntwiderständen [6]. Das Foto eines Testaufbaus ist am Ende dieser Beschreibung zu finden. Die elektrischen Daten der elektronischen Last hängen von der äußeren Beschaltung ab. Die Leiterplatte kann maximal sieben FETs getrennt steuern und maximal 7 Shuntwiderstände zur Messung des Stroms verwenden. Eine Teilbestückung ist möglich.

Für andere Shuntwiderstände und Strombereiche müssen einige Widerstände geändert werden. Eine Berechnungsvorlage steht in [5]. Für diese unterschiedlichen Versionen muss die Firmware geändert werden. Bei einer Verwendung im MYC System müssen dann auch die Befehlsbeschreibungen (announcements) geändert werden, wenn sich die Wertebereiche ändern.

Die vorliegende Beschreibung und Schaltung bezieht sich auf eine Version mit IRFP150 FETs (100V, 30A und ca 200W maximale Verlustleistung pro FET) mit 10mOhm Shunt.

Die aufgebaute Schaltung ist bis 90V, 210A und 350W mit dem verwendeten Kühlkörper einsetzbar. Um die 30A pro FET zu erreichen ist eine Spannung des Meßobjekts von 1,8V minimal notwendig. Die Auflösung bei der Spannungsmessung beträgt nominal 88mV, die der Strommessung 29mA für jeden Messwiderstand / FETs. Die Firmware versucht, so wenige FETs wie möglich zu verwenden, um die Genauigkeit zu erhöhen und teilt die Leistung möglichst gleichmäßig auf, wenn mehrere FETs verwendet werden.

Pro Messwiderstand soll ein FET verwendet werden. Das Parallelschalten von FETs ist grundsätzlich möglich, kann aber zu ungleichmäßiger Verteilung der Ströme führen.

Man kann den gewünschten Strom, Widerstand oder die gewünschte Leistung für die Last vorgeben.

Bei Überlast, die nicht durch das Zuschalten weiterer FETs vermieden werden kann, schaltet die gesamte Last sofort hochohmig.

Beim Wechsellastbetrieb wird die Last aus und eingeschaltet. Dies Schaltzeit ist einstellbar. Die Spannung kann dann mit einen Oszillographen gemessen werden. Während des Wechsellastbetriebs wird der Widerstand nicht geregelt (On-off\_mode = 2) oder normal geregelt (On\_off\_mode = 1).

Während der Auszeit wird der letzte gemessene Strom / Leistung zur Verfügung gestellt.

Das Gerät versteht das MYC Protokoll; die Befehle und Parameter müssen binär eingegeben werden. Für Details zum MYC Protokoll siehe [3] und [4] (aktuell)

Defaultmäßig sind alle Schnittstellen aktiv. Mit dem Initialisierungsbefehl können diese aber deaktiviert werden. Der Initialisierungsbefehl funktioniert aber immer.

## Grundsätzliche Funktion

Die elektronische Last arbeitet als Zweipunktregler mit einer Hysterese vom Wert der Auflösung des Stromes. Die Auflösung der Strommessung beträgt 29mA; der Strom kann sich also um 58mA pro FET verändern. Die relative Genauigkeit ist vom gewünschten, eingestellten Wert abhängig. Es ist möglich, dass die elektronische Last beim Einschalten kurze Zeit (< 10ms) niederohmig ist. Es wird daher empfohlen, das zu messende Gerät erst anzuschließen, wenn die 5V Spannung an der Steuerung anliegt.

Nach dem Start sind die FETs ausgeschaltet. Nachdem die Messspannung 400mV überschritten hat, kann ein Stromwert, Widerstandswert oder eine gewünschte Leistung eingegeben werden, Danach wird der Widerstand der FETs der Reihe nach verringert und dabei Strom und Spannung gemessen. Die Steuerung macht circa 1400 Messungen pro Sekunde. Eine Änderung des Widerstandes aller 7 FETs vom maximalen zum minimalen Widerstand dauert circa 20 Sekunden ( $4095 * 7 / 1400$ ). Die Regelung ist also relativ langsam.

Daher kann es bei sehr schnellem Ansteigen von Strom oder Leistung durch Erhöhung der angelegten Spannung passieren, dass die Last abschaltet, obwohl bei Überlast zunächst der Widerstand aller FETs erhöht wird und ein weiterer FET zugeschaltet wird (wenn vorhanden). Danach setzt die normale Regelung wieder ein. Ist ein Grenzwert weiter überschritten, werden alle FETs abgeschaltet.

Bei sehr großen Spannungsschwankungen muss gegebenenfalls in der Firmware der Wert für „Reduction“ erhöht werden.

Bei gewünschtem Widerstand und Leistung wird bei sich ändernder Spannung der notwendige Strom und gegebenenfalls die sich ergebende Leistung neu berechnet. Wird der maximal mögliche Wert überschritten, wird sofort abgeschaltet.

Wird die Messspannung unterbrochen, werden alle FETs sofort hochohmig geschaltet; der gewünschte Widerstand, Strom oder die Leistung muss neu eingegeben werden.

In einem normalen MYC System werden die Befehle &HE1 - &HEF nicht verwendet: sie werden vom Commandrouter nicht weitergegeben.

Sie dienen zur Einstellung der maximalen FET Verlustleistung, Zahl der FETs und zur Eichung.

Um den Test nach dem Aufbau zu erleichtern, gibt es den Befehl &HE5<n><m>; siehe unter Test und Eichung.

## Hinweise zur Bedienung

Vor dem normalen Betrieb sollte die Einstellung einiger Parameter und eine Eichung vorgenommen werden; siehe unten.

Nach dem Einschalten ist bei normalem Betrieb die Last abgeschaltet.

Vor der Eingabe der Befehle für gewünschte Werte von Strom, Leistung oder Widerstand muss eine Spannung größer als die Minimalspannung (400mV) anliegen.

Um zum Beispiel eine Leistung vorzugeben, muss die Leistung mit (zum Beispiel) &H09000400 gewählt werden. 000400 ist ein 3 stelliger Hex Wert mit 10mW Stufung, also 10,24W. Werden wegen der Maximalleistung pro FET und Zahl der vorhandenen FETs zu hohe Werte eingegeben, gibt es eine Fehlermeldung; zu sehen mit dem Befehl &HFC.

Es wird zunächst die minimal mögliche Zahl der verwendeten FETs berechnet, abhängig von der Verlustleistung. Die Spannung kann nachträglich verändert werden.

Statt der Leistung kann auch der Strom oder Widerstand vorgegeben werden.

Die Spannung kann immer gemessen werden, die Ströme nur, wenn die elektronische Last in

Betrieb ist oder zum Testen mit &HE5<n> ein FET aktiviert wurde.  
Die Abschaltung aller FETs erfolgt mit &H12.  
Die Messauflösung beträgt 10Bit (1024 Stufen). Bei kleinen Strömen (Spannungen) ist die Genauigkeit daher begrenzt. Zum Beispiel beträgt bei 5V Messspannung die Genauigkeit nur (88mV / 5V) ca 18%. Hinzu kommt die Ungenauigkeit durch die Strommessung.  
Bei Wechsellastbetrieb können kleine Periodendauern bis 1ms eingestellt werden. Allerdings werden Genauigkeit der Zeiten mit geringer Zeit ungenauer wegen interner Laufzeiten. Die minimal erreichbare Zeit liegt bei ca 2ms in unregelten Mode (On\_off\_mode = 2).

## Befehle

Zu Details zum MYC Protokoll und zur Bedienung siehe [3] und [4] (aktuell).  
Folgende Befehle werden von der I2C / RS232 / USB Schnittstelle akzeptiert; dies ist eine Kopie aus dem Bascom Programm:

### Announce0:

'Befehl &H00; 1 byte / 1 byte + string  
'eigenes basic announcement lesen  
'basic announcement is read to I2C or output  
Data "0;m;DK1RI;electronic load for 7 IRFP150;V02.1;1;145;1;47;1-1"  
,

### Announce1:

'Befehl &H01 (resolution 10mV); 1 byte / 3 byte  
'lese aktuelle Spannung  
'read actual voltage  
Data "1;ap,read actual voltage;1;10001,{0.00 to 900.00};lin;V"  
,

### Announce2:

'Befehl &H02; 1 byte / 3 byte  
'liest gesamten Strom (1Bit -> 10mA)  
'read all current  
Data "2;ap,read actual current;1;21001,{0.00 to 210.00};lin;A"  
,

### Announce3:

'Befehl &H03 0 - 6 (resolution 10mA); 2 byte / 4 byte  
'liest aktuellen Strom eines FETs  
'read actual current of a FET  
Data "3;ap,read actual current;7;30001,{0.00 to 30.00};lin;A"  
,

### Announce4:

'Befehl &H04 (resolution 10mW); 1 byte / 4 byte  
'liest gesamte Leistung  
'read all current  
Data "4;ap,read actual power;1;35001,{0.00 to 350.00};lin;W"  
,

### Announce5:

'Befehl &H05 0 - 6 (resolution 10mW); 2 byte / 4 Byte  
'liest aktuelle Leistung eines FETs  
'read actual power of a FET  
Data "5;ap,read actual power;7;5001,{0.00 to 50.00};lin;W"

,  
Announce6:  
'Befehl &H06 (resolution mOhm); 1 byte / 4 byte  
'liest aktuellen Widerstand  
'read actual resistor  
Data "6;ap,read actual resistor;1;300000,{10 to 3000000};lin;mOhm"  
,

Announce7:  
'Befehl &H07 0 - 21000 (10mA resolution); 3 byte / -  
'gewuenschten Strom  
'required current  
Data "7;op,required current;1;21001,{0.00 to 210,00};lin;A"  
,

Announce8:  
'Befehl &H08 (10mA resolution); 1 byte / 3 byte  
'gewuenschten Strom lesen  
'read required current  
Data "8;ap,as7"  
,

Announce9:  
'Befehl &H09 0 - 65535 (10mW resolution); 4 byte / -  
'gewuenschte Leistung  
'required power  
Data "9;op,required power;1;140001,{0.00 to 1400.00};lin;W"  
,

Announce10:  
'Befehl &H0A (10mW resolution); 1 byte / 4 byte  
'gewuenschte Leistung lesen  
'read required power  
Data "10;ap,as9"  
,

Announce11:  
'Befehl &H0B 10mOhm - 3kOhm (resolution 1mOhm); 4 byte / -  
'gewuenschten Widerstand schreiben  
'write required resistor  
Data "11;op,required resistor:1;2999999,{1 to 3000000};lin;mOhm"  
,

Announce12:  
'Befehl &H0C (resolution 10mOhm); 1 byte / 4 byte  
'gewuenschter Widerstand lesen  
'read required resistor  
Data "12;ap,as11"  
,

Announce13:  
'Befehl &H0D 0|1|2; 2 byte / -  
'Wechselast schreiben  
'write on /off mode  
Data "13;or,on off mode;1;0,off,1,regulated;2,fixed"  
,

Announce14:

'Befehl &H0E; 1 byte / 2 byte  
 'Wechselast lesen  
 'read on /off mode  
 Data "14;ar,as13"  
 '

Announce15:  
 'Befehl &H0F; 2 byte / -  
 'Zeit für Wechselast schreiben  
 'write time for on - off mode  
 Data "15;op,time for on off mode;1;10000,{0.001 to 10.000};lin;s"  
 '

Announce16:  
 'Befehl &H10; 1 byte / 2 byte  
 'Zeit für Wechselast lesen  
 'read time for on - off mode  
 Data "16;aa,as15"  
 '

Announce17:  
 'Befehl &H11; 1 byte / 2 byte  
 'Mode lesen  
 'read mode  
 Data "17;ar,read mode;1;0,off;1,register;2,I;3,P;4,R;;5,I calibration"  
 '

Announce18:  
 'Befehl &H12; 1 byte / -  
 'schaltet Last ab  
 'switch off  
 Data "18;ou,switch off;1;0,idle;1,off"  
 '

Announce19:  
 'Befehl &H13; 2 byte / -  
 'Zahl der aktiven Fets lesen  
 'read number of active FETs  
 Data "19;ar,read number of active FETs;1;b,{1 to 7}"  
 '

Announce20:  
 'Befehl &H14; 2 byte / -  
 'Zahl der benutzten Fets lesen  
 'read number of used FETs  
 Data "20;ar,read number of used FETs;1;b,{1 to 7}"  
 '

Announce21:  
 'Befehl &H15; 1 byte / 3 byte  
 'Maximale Leistung pro Fet lesen  
 'read maximum power per FET  
 Data "21;lp,maximum power per FET;1;5001,{0 to 50,00};lin;Watt"  
 '

Announce22:  
 'Befehl &HE1; 3 byte / -  
 'Maximale Leistung pro Fet

'maximum power per FET  
Data "225;kp;maximum power per FET;1;5001,{0 to 50,00};lin;Watt"  
,

Announce23:  
'Befehl &HE3 (0 to 127); 2 byte / -  
'Aktive FETs binär schreiben  
'write active FETS binary  
Data "227;ka,active FETs, binary;b,{0 to 127}"  
,

Announce24:  
'Befehl &HE4; 1 byte / 2 byte  
'Aktive FETs binär lesen  
'read active FETS binary  
Data "228;la,as227"  
,

Announce25:  
'Befehl &HE5 0 to 6 , 0 to 4095; 4 byte / -  
'Fet control register einstellen  
'set fet control register  
Data "229;km,set fet control register;6;w,{0 to 4095}"  
,

Announce26:  
'Befehl &HE6; 2 byte / 4 byte  
'Fet control register lesen  
'read fet control register  
Data "230; lm,as229"  
,

Announce27:  
'Befehl &HE7; 2 byte / 4 byte  
'ADC register lesen  
'read ADC register  
Data "231; lp,read ADC register;6;1024;lin;-"  
,

Announce28:  
'Befehl &HE8 0 to 9000; 3 byte / -  
'Spannung für Spannungseichung schreiben  
'write voltage for voltage calibration  
Data "232;ap,calibration voltage;1;9001,{0.00 to 90.00};lin;V"  
,

Announce29:  
'Befehl &HE9; 1 byte / 3 byte  
'Spannung für Spannungseichung lesen  
'read voltage for calibration  
Data "233;la,as232"  
,

Announce30:  
'Befehl &HEA; 1 byte / -  
'Spannung eichen  
'calibrate Voltage  
Data "234;ku,calibrate voltage;1;0,,idle;1 calibrate voltage"  
,

```

,
Announce31:
'Befehl &HEB:1 byte / 2 byte
'Spannungseichung lesen
'read voltage calibration
'Data "235;lp,read voltage calibration;1:10001;lin;-"
,
Announce32:
'Befehl &HEC 0 to 30000; 3 byte / -
'Strom für Stromeichung schreiben
'write current for current calibration
Data "236;op,current for calibration;1;3001,{0.00 to 30.00};lin:A"
,
Announce33:
'Befehl &HED; 1 byte / 3 byte
'Strom für Stromeichung lesen
'read current for calibration
Data "237;ap,as236"
,
Announce34:
'Befehl &HEE 0 - 6 ; 2 byte / -
'Strom eichen
'calibrate Current
Data "238;ku,calibrate current;0,FET1;1,FET2;2,FET3;3FET4;4,FET5;5,FET6;6,FET7"
,
Announce35:
'Befehl &5EF; 2 byte / 4 byte
'Stromeichung lesen
'read current calibration
Data "239;lp,read current calibration;7;4001;lin;-"
,
Announce36:
'Befehl &HF0<n><m>
'liest announcements
'read m announcement lines
Data "240;ln,ANNOUNCEMENTS;145;47"
,
Announce37:
'Befehl &HFC
'Liest letzten Fehler
'read last error
Data "252;aa,LAST ERROR;20,last_error"
,
Announce38:
'Befehl &HFD
'Geraet aktiv Antwort
'Life signal
Data "253;aa,MYC INFO;b,ACTIVE"
,
Announce39:

```

'Befehl &HFE :

'eigene Individualisierung schreiben

'write individualization

Data "254;ka,INDIVIDUALIZATION;20,NAME,Device 1;b,NUMBER,1;a,I2C,1;b,ADRESS,21,{0 to 127};a,RS232,1;a,USB,11"

Announce40:

'Befehl &HFF :

'eigene Individualisierung lesen

'read individualization

Data "255;la,INDIVIDUALIZATION;20,NAME,Device 1;b,NUMBER,1;a,I2C,1;b,ADRESS,21,{0 to 127};a,RS232,1;b,BAUDRATE,0,{19200};3,NUMBER\_OF\_BITS,8n1;a,USB,1"

Announce41:

' Undervoltage

Data "R !\$7 !\$9 !\$11 IF \$1<400"

Announce42:

' On- off mode only during operation

Data "R \$0D IF &11>0"

Announce43:

' Switch off, if power is exceeded

Data "R \$11=0! IF \$4>\$14\*\$15"

Announce44:

' Switch off, if current is exceeded

Data "R \$11=0! IF \$3>3000"

Announce45:

Data "S !E5 !EA !EE IF \$1<400"

Announce46:

Data "S E5&0 IF \$11 = 1"

## I2C

Die Default Adresse ist 21 (&H15).

Mit dem Befehl &HFE3<n> kann die Adresse in n (1 ... 127) geändert werden.

Pullup Widerstände für den I2C Bus (R1/R2) können bei Bedarf bestückt werden. Der Gesamtwiderstand am Bus sollte zwischen 1 und 10 kOhm liegen.

## Fehlermeldungen

Der Befehl &HFC liefert den letzten Fehler im Format:

aktuelle Befehlsnummer - Fehler – letzte Befehlsnummer vor Auftritt des Fehlers

Dazu werden die empfangenen Befehle von 1 bis 254 umlaufend gezählt.

Nach 254 korrekten Befehlen wird der Fehlereintrag gelöscht.

## Reset



Ist der Reset Jumper JP4 beim Anlegen der Versorgungsspannung überbrückt, werden wieder die Defaultwerte eingelesen. Dies ist hilfreich, wenn die aktuelle I2C Adresse verloren gegangen ist.

## **Watchdog**

Die Befehlseingabe und Ausführung muss in weniger als 1 Sekunde beendet sein. Danach werden die bereits empfangenen Daten gelöscht. Dies soll falsche Eingaben vermeiden. Mit dem &HFC "letzten Fehler" Befehl kann man Eingabefehler sehen.

Bei einem Lesebefehl müssen die Daten innerhalb von 10 Sekunden vom I2C Master abgeholt werden – wenn die I2C Schnittstelle gerade verwendet wird. Danach werden die Daten gelöscht. Diese Zeit kann mit dem Wert Tx\_factor im Bascom Programm geändert werden. Neue Befehle können erst eingegeben werden, wenn alle Daten abgeholt wurden. Wird die RS232 / USB Schnittstelle verwendet, werden die Daten sofort ausgegeben.

Es gibt einen kompletten Reset, wenn die Hauptschleife länger als 2 Sekunde dauert, zum Beispiel, wenn die I2C Schnittstelle nicht korrekt arbeitet.

## **Software**

Die Steuerung übernimmt ein AVR Mikrocontroller Atmega644 oder größer.  
Die Software wurde in BASCOM geschrieben [2]

## **Programmierung des Prozessors**

Zur Programmierung des Prozessors ist ein 6poliger ISP Stecker (JP6) vorhanden.

Die Fuses müssen möglicherweise programmiert werden (siehe Bascom Programm) !! Prozessortyp und Frequenz müssen gegebenenfalls angepasst werden. Beim Programmieren sollte der Jumper JP1 entfernt werden. Bei einigen Prozessoren muss JTAG disabled werden!

## **RS232 Schnittstelle**

Schnittstellenparameter: 19k2 8N1

I2C und RS232 / USB können nicht gleichzeitig verwendet. Der Befehlspeicher wird gelöscht, wenn die Schnittstelle gewechselt wird.

## **USB Schnittstelle**

Die Schaltung kann alternativ zu RS232 mit der USB Platine UM2102 von ELV bestückt werden.

Die USB Platine wird plan auf der Oberseite der Interfaces verlötet: der USB Stecker zeigt seitlich nach außen. Die mittleren 4 pins des Verbinders ST2 sind mit dem 4 poligen Verbinder JP7 auf der Leiterplatte zu verbinden. USB Platine und Steuerungsplatine müssen voneinander isoliert werden.

## **SMD**

Die Leiterplatte ist teilweise mit SMD bestückt, außer den Operationsverstärkern nur recht große Bauteile (1206). Es gibt zwei Varianten der Leiterplatte. Die eine mit 7 5(6) poligen Einfach Operationsverstärkern, die andere mit 2 14 poligen Operationsverstärkern ist einfacher zu löten und in Zukunft bevorzugt.

## **Stromversorgung**

Die Stromversorgung ist 12V, Stromaufnahme ca. 20mA (2mA mit USB) max.

## Aufbau

Die FETs sollten so montiert werden, dass alle möglichst die gleiche Verlustleistung aufnehmen können, da nur ein Wert als Grenzwert angegeben werden kann.

Sinngemäß das gleiche gilt für die Messwiderstände.

Bei den verwendeten FETs ist die Kühlfläche und Drain miteinander verbunden. Bei Montage auf dem Kühlkörper ohne Isolation muss dieser **bei hohen Spannungen berührungssicher** aufgebaut werden.

Die verwendeten Messwiderstände sind bis 500V isoliert und können direkt auf den Kühlkörper geschraubt werden.

Der Widerstand zur Messung der Spannung kann in einen Widerstand auf der Steuerplatine und einen externen Widerstand aufgeteilt werden. Dadurch bleiben die Spannungen auf der Leiterplatte niedrig. Die Spannung an den Stromeingängen darf 5V nicht überschreiten.

Die Widerstände an den Gates der FETs sollten direkt an die FETs angelötet werden.

Die Masse der Steuerungsleiterplatte und der äußeren Beschaltung sollen an nur einer Stelle miteinander verbunden werden.

C28, R28, R29 und der externe Widerstand zur Spannungsmessung bilden einen Tiefpass. Die Zeitkonstante soll bei circa 1ms liegen.

Als SMD Operationsverstärker können verschiedene Typen der MCP603x Familie verwendet werden. 5 oder 6 polige Typen sind möglich; die Offsetspannung sollte  $\leq 150\mu\text{V}$  sein. Diese gibt es nur als SMD Bauteile. Die Grenzfrequenz ist nicht kritisch. Da sich die 14poligen SO Gehäuse etwas einfacher verarbeiten lassen, gibt es auch eine Leiterplattenversion dafür.

Teilbestückung und Bestückung mit anderen FETs ist möglich. Für jeden der sieben Kanäle muss jeweils der DAC mit OPamp und der OPamp zur Strommessung mit zugehörigen Widerständen bestückt werden. Die Widerstände nicht benutzter Eingänge der Treiber / OPamps sollten aber auch bestückt werden. Die Programm müssen die Konstanten, Announcements und die Regeln angepasst werden.

Die Spule L1 (ca 22uH) kann überbrückt werden. Sie dient zur Unterdrückung möglicher Störungen in HF empfindlicher Umgebung.

Bei Verwendung von ISP muss JP6 bestückt werden.

Folgende Bauteile sind abhängig vom verwendeten Interface zu bestücken:

mit RS232 Schnittstelle:

IC13, IC2, C5 – C8, X4 (9 polige Buchse)

mit USB (nicht gleichzeitig mit RS232)

UM2102

mit I2C

R1, R2 nach Bedarf, X2, X3

Bei normalem Betrieb muss JP1 (Power) gesteckt sein.

## Anschlüsse

### Power

Tip 12V  
Ring GND

### RS232 (Buchse)

5 GND  
2 TX (PC Eingang)  
3 RX (PC Ausgang)

### I2C (2 x 3,5mm Klinke, Stereo)

Sleeve GND  
Ring SDA  
Tip SCL

### Gates SL1

1 zum Gate FET7  
2 zum Gate FET6  
3 zum Gate FET5  
4 zum Gate FET4  
5 GND

### Gates SL2

1 zum Gate FET3  
2 zum Gate FET2  
3 zum Gate FET1  
4 GND  
5 GND

### Iin SL4

1 + Shunt FET1  
2 - Shunt FET1  
3 + Shunt FET2  
4 - Shunt FET2  
5 + Shunt FET3

### Iin SL5

1 - Shunt FET3  
2 + Shunt FET4  
3 - Shunt FET4  
4 + Shunt FET5  
5 - Shunt FET5

### U/Iin SL6

1 + Shunt FET6  
2 - Shunt FET6  
3 + Shunt FET7  
4 - Shunt FET7  
5 Spannung (über äußeren Widerstand)

## Die äußere Beschaltung

Ich habe 7 FETS IRFP150 aus der Bastelkiste verwendet. Dies ergibt als Grenzbelastung 90V, ca 210A (bei 175 Grad Tj) und eine Verlustleistung von ca 350W. Mehr Wärme kann der vorhandenen Kühlkörper nicht abführen.

Direkt am Gate der FETs wurden 10kOhm Widerstände angelötet (siehe [6]).

Als Shunt wurde ein 10mOhm, 10W Shunt von Isabellenhütte verwendet.

Zur Strombegrenzung bei Falschpolung der Messspannung muss eine geeignete Sicherung vorgesehen werden. Die FETs leiten dann über die immer bei MOSFETs vorhandene Rückwärtsdiode.

## Die Messspannung darf nicht direkt angeschlossen werden, sondern nur über einen extern Widerstand (51kOhm bei 90V)

### Test und Eichung

Nach dem Aufbau kann zum Test kann der Befehl `&HE5<n><m>` verwendet werden. `<n>` ist die Nummer des Fets (0 - 6). Es wird immer nur ein Fet eingeschaltet.

`<m>` ist ein Wert, der in das Register des DA Wandler geschrieben wird (0 – 4095). Dieser bestimmt den Widerstand des Fets. Hohe Werte sperren den Fet.

Während der Testphase kann der Stromwert mit `&H02` oder der Registerinhalt des ADWandlers (mit `&HE7<n>`) gelesen werden.

Der Testmode wird mit `&H12` beendet.

Eine Eichung von Spannung und Strom ist wird empfohlen. Dazu sollten möglichst hohe Werte für Strom und Spannung verwendet werden.

Diese Beschreibung gilt für die aufgebaute Schaltung mit  $U_{max} = 90V$  und  $I_{max} = 30A$  pro FET.

Da 90V möglicherweise nicht zur Verfügung stehen, kann mit dem Befehl `&HE8` die angelegte Spannung (0 – 90,000V) (in mV!) angegeben werden. Die Eichung erfolgt mit dem Befehl `&HEA`.

Die Stromeichung erfolgt für jeden FET getrennt. Da ein Netzteil mit Strombegrenzung für hohe Ströme eher nicht zur Verfügung steht, wird der oben beschriebene Testmode der elektrischen Last selbst dafür verwendet.

Mit `&HE5<n><m>` stellt man einen möglichst hohen Strom ein, den man mit einem externen Messgerät misst. Dabei ist die Verlustleistung zu beachten. Bei zu hoher Leistung schaltet die Last ab.

Danach kann man den Strom noch durch Änderung der Spannung anpassen, da sich bei fester Gatespannung der Widerstand wenig ändert.

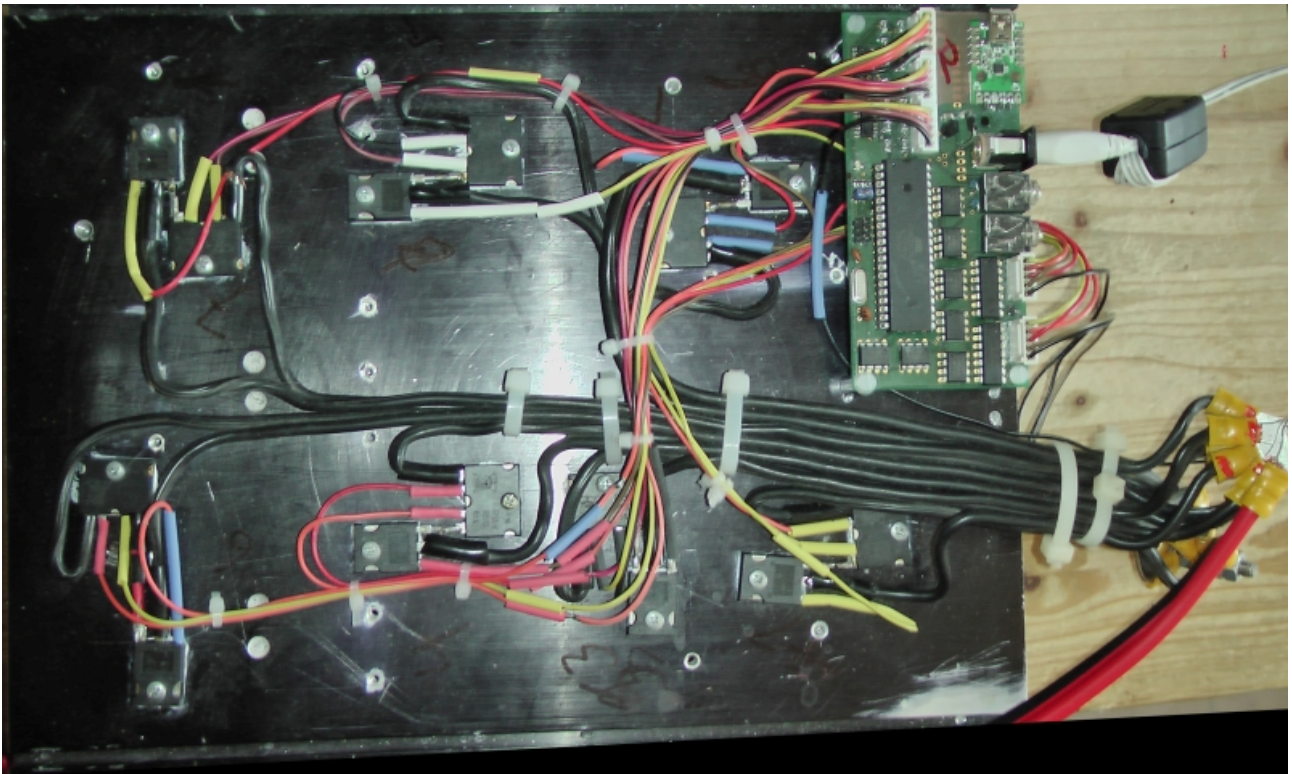
Allerdings steigt der Strom bei fest angelegter Gatespannung mit steigender Temperatur des FET. Dieser kann mit dem Befehl `&HEC0000` gemessen und stabilisiert werden.

Den richtigen, gemessenen Stromwert (entsprechend dem Messgerät) gibt man dann mit dem Befehl `&HEC` ein: zB `&HEC2710` für 10A. Der Stromwert hat 1mA Auflösung! Der Stromwert muss größer als 3.3% des Maximalstroms des Fets sein (also 100mA). Ein Eichung mit so kleinen Strömen ist aber auch nicht sinnvoll.

Die Eichung wird durch den Befehl `&HEE<n>` durchgeführt. Der Wert für `<n>` (Fetnummer) muss bei dem `&HE7` und `&HE5` Befehl der gleiche sein.

Die so berechneten Korrekturfaktoren dürfen nicht mehr als 15% vom Defaultwert abweichen. Andernfalls liegt wahrscheinlich ein Fehler vor. Die Korrekturfaktoren können mit `&HEF<n>` gelesen werden.

## Ein Testaufbau



Dieser Testaufbau ist für hohe Spannungen in dieser Form nicht geeignet!

## Versionen

Diese Beschreibung gilt für die  
Leiterplattenversion V01.3 / V02.0  
Bascom Version 02.1

## Copyright

Die Ideen in diesem Dokument unterliegen der GPL (Gnu Public Licence V2) soweit keine früheren, anderen Rechte betroffen sind.

Die Verwendung der Unterlagen erfolgt auf eigene Gefahr; es wird keinerlei Garantie / Gewährleistung / Produkthaftung übernommen.

The ideas of this document can be used under GPL (Gnu Public License V2) as long as no earlier other rights are affected.

The usage of this document is on own risk, there is no warranty.

## Referenzen

- [1] [https://www.dk1ri.de/dhw/electronic\\_load\\_eagle.zip](https://www.dk1ri.de/dhw/electronic_load_eagle.zip)
- [2] [https://www.dk1ri.de/dhw/electronic\\_load.zip](https://www.dk1ri.de/dhw/electronic_load.zip)
- [3] <http://www.dk1ri.de/myc/MYC.pdf>
- [4] <https://dk1ri.de/myc/Description.txt> oder <https://dk1ri.de/myc/Description.pdf> (englisch)

- [5] <https://dk1ri.de/myc/Definitions.txt> oder <https://dk1ri.de/myc/Definitions.pdf> (englisch)
- [6] [dk1ri.de/dhw/electronic\\_load\\_external\\_circuit.png](https://dk1ri.de/dhw/electronic_load_external_circuit.png)
- [7] [dk1ri.de/myc/Definitions.pdf](https://dk1ri.de/myc/Definitions.pdf) (englisch)