

## Ergänzung zum Beitrag in FA 1/21, S. 34 f. „Modul zur Strombegrenzung mit optionaler Schaltfunktion“

Ergänzend zum Beitrag folgen hier noch Untersuchungen zum Zeitverhalten der Schaltung bei unterschiedlicher Lastströmen und mit unterschiedlich großen Stützkondensatoren am Ausgang.

Für die Bilder A1 und A2 war der Masseanschluss des Moduls mit der Minusleitung verbunden, das Modul also dauerhaft eingeschaltet. Ein Lastwiderstand von  $1\ \Omega$ , der einem Ausgangskurzschluss nahekommt, wurde durch einen Leistungs-MOSFET periodisch dem Ausgang parallelgeschaltet. Das MOSFET-Ansteuersignal ist jeweils blau dargestellt, die Ausgangsspannung des Moduls rot. Beide Oszilloskopkanäle sind auf Gleichspannungskopplung (Schalterstellung DC) geschaltet.

### ■ Messung 1: Untersuchung der Schnelligkeit der Schaltung

Messbedingungen bei der Untersuchung der Schnelligkeit der Schaltung (Bild A1):  $U_E = 25\text{ V}$ ,  $C_E = 470\ \mu\text{F}$ ,  $C_A = 0$ ,  $R_{\text{Last}} = \infty$ . Ohne Ausgangslast (MOSFET-Ansteuersignal auf Null) ist  $U_A = U_E = 25\text{ V}$ . Nach Zuschalten des Beinahe-Kurzschlusses nimmt  $U_A$  für ungefähr  $4\ \mu\text{s}$  einen Wert von  $22\text{ V}$  an, entsprechend  $22\text{ A}$  Ausgangsstrom (gekennzeichnet mit *a*). Die hierbei fließende Ladung von  $Q = I \cdot t$  beträgt etwa  $8,8 \cdot 10^{-5}\text{ As} = 88\ \mu\text{C}$  (Mikro-Coulomb).

Zum Vergleich: Wäre am Ausgang ein Stützkondensator von lediglich  $10\ \mu\text{F}$  parallelgeschaltet und auf  $25\text{ V}$  geladen, so hätte er gemäß  $Q = C \cdot U$  eine deutlich größere Ladung von  $250\ \mu\text{C}$  gespeichert.

Im Falle eines Fehlers der angeschlossenen Schaltung hätte der kleine Kondensator also mehr Schädigungspotenzial als der kurzzeitig fließende Strom infolge der Trägheit des Strombegrenzungsmoduls. Nach  $20\ \mu\text{s}$  bis  $30\ \mu\text{s}$  stellt sich eine Aus-

gangsspannung von etwa  $1,6\text{ V}$  ein, was mit  $R_{\text{Last}} = 1\ \Omega$  dem festgelegten Strom  $I_{\text{max}} = 1,6\text{ A}$  entspricht (Verlauf *b*).

### ■ Messung 2: Verhalten mit großem Kondensator am Ausgang

Messbedingungen bei der Untersuchung des Verhalten mit großem Kondensator am Ausgang, Bild A2:  $U_E = 25\text{ V}$ ,  $C_E = 470\ \mu\text{F}$ ,  $C_A = 1000\ \mu\text{F}$ ,  $R_{\text{Last}} = 1\ \Omega$ , geringere

schnitt *c*) jedoch etwas verlangsamt, denn der Konstantstrom von  $I_{\text{max}}$  wird ja ständig nachgeliefert.

Als bald nimmt die Ausgangsspannung wieder ihren stationären Wert von  $U_A = 1,6\text{ V}$  an (Abschnitt *d*), wie in Bild A1. Die Ladung, die in  $C_A$  gespeichert war und die in  $R_{\text{Last}}$  floss, ist mit  $920\ \mu\text{F} \cdot 25\text{ V} = 23\text{ mC}$  sehr viel größer als die von der Strombegrenzung durchgelassenen  $88\ \mu\text{C}$ .

Bild A1:  
Schnelligkeit der  
Strombegrenzung

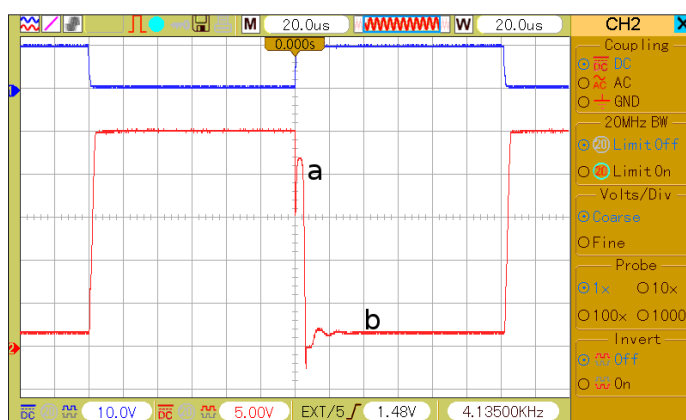
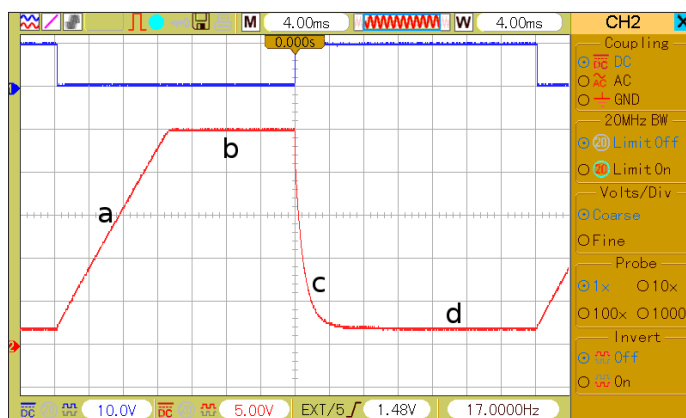


Bild A2:  
Verhalten mit  
großem  
Kondensator  
am Ausgang



Schaltfrequenz der Last (geänderten Zeitmaßstab beachten!)

Nach Wegfall der Last  $R_{\text{Last}}$  steigt die Ausgangsspannung  $U_A$  linear an (Abschnitt *a*). Aus der Kondensatorgleichung  $dU_C/dt = i_C/C$  und dem zuvor mithilfe des Kapazitätsmessers PeakTech 3710 ermittelten Wert  $C_A = 920\ \mu\text{F}$  lässt sich aus der Steilheit des Anstiegs von  $23\text{ V}/13\text{ ms}$  ein Ladestrom von  $I_C = 1,63\text{ A}$  errechnen, in guter Übereinstimmung mit dem Wert für  $I_{\text{max}}$  der Strombegrenzung. Sobald  $C_A$  aufgeladen ist, bleibt  $U_A$  bei  $25\text{ V}$  stabil (Abschnitt *b*).

Wenn die Last  $R_{\text{Last}}$  erneut zugeschaltet wird, entlädt sich  $C_A$  über  $R_{\text{Last}}$  mit einer Zeitkonstante  $\tau = C_A \cdot R_{\text{Last}} = 0,92\text{ ms}$  (Ab-

Auf der nächsten Seite wird in weiteren Messungen das Schaltverhalten des Moduls betrachtet. Hierzu wurde dessen Masseanschluss über die Kollektor-Emitter-Strecke eines Bipolartransistors BC337 periodisch mit der Minusleitung des Stromkreises verbunden, vergleichbar mit einem Öffnen und Schließen des Schalters in Bild 2 des Beitrags. Die Transistor-Ansteuerspannung ( $5\text{ V}$  der Basis über  $1\text{ k}\Omega$  zugeführt) ist jeweils blau dargestellt, die Modul-Ausgangsspannung wieder in Rot.

Tabelle 1: Stückliste für die Schaltung gemäß Bild 2 des Beitrags

Bez.	Artikel-Nr.	Bezug	Bauform
VT1	511-STP52P3LLH6	[4]	TO-220
IC1	LM 4040 CIM3-4.1	[5]	SOT-23
IC2	MCP 6471T-E/OT	[5]	SOT-23
R1	SMD 1/4W 2,2K	[5]	1206
R2	SMD 1/4W 1,0M	[5]	1206
R3	SMD 1/4W 3,9K	[5]	1206
R4	ISA SMS-R010-1	[5]	2512
R5	SMD 1/4W 47	[5]	1206

[4] Mouser Electronics: [www.mouser.de](http://www.mouser.de)

[5] Reichelt Elektronik: [www.reichelt.de](http://www.reichelt.de)

### ■ Messung 3: Verhalten ohne Strombegrenzung

Messbedingungen beim Schalten ohne Strombegrenzung (Bild A3):  $U_E = 15\text{ V}$ ,  $C_E = 470\text{ }\mu\text{F}$ ,  $C_A = 0$ ,  $R_{\text{Last}} = 11\text{ }\Omega$

Bei eingeschaltetem Modul (Abschnitte *a*) entspricht die Ausgangs- der Eingangsspannung, das Modul ist also voll durchgesteuert, denn  $I_{\text{Last}}$  liegt mit  $15\text{ V}/11\text{ }\Omega = 1,36\text{ A}$  noch unterhalb von  $I_{\text{max}}$ . Nach dem Ausschalten folgt die Abfallflanke von  $U_A$  (Verlauf *b*) etwa  $70\text{ }\mu\text{s}$  verzögert. Ursache hierfür ist die in der Gate-Source-Kapazität von VT1 noch gespeicherte Ladung, die nicht sofort über den inaktiven IC2 kurzgeschlossen wird. Aber sobald dies geschehen ist, geht  $U_A$  auf Null (Verlauf *c*). Eine Beschleunigung wäre bei Bedarf durch einen zusätzlichen Widerstand von einigen Kiloohm zwischen Gate und Source möglich, wodurch allerdings der geringe Eigenstromverbrauch des Moduls ( $200\text{ }\mu\text{A}$ , siehe Beitrag) auf ungefähr  $1\text{ mA}$  anstiege. Das wäre bei der Bemessung von  $R_1$  zu berücksichtigen.

Beim Wiedereinschalten (Verlauf *d*) ist die Trägheit wesentlich geringer, denn IC2 steuert VT1 sofort wieder durch.

### ■ Messung 4: Verhalten mit Strombegrenzung

Messbedingungen beim Schalten mit Strombegrenzung (Bild A4):  $U_E = 25\text{ V}$ ,  $C_E = 470\text{ }\mu\text{F}$ ,  $C_A = 0$ ,  $R_{\text{Last}} = 11\text{ }\Omega$

Weil der Strom mit  $U_E/R_{\text{Last}} = 2,27\text{ A}$  jetzt größer als der für  $I_{\text{max}}$  gewählte Wert ist, wird die Strombegrenzung in jeder Ein-Phase des Moduls aktiv, und  $U_A$  geht erwartungsgemäß nur auf  $I_{\text{max}} \cdot R_{\text{Last}} = 17,6\text{ V}$  (Abschnitte *a*). Da der Ausgang von IC2 nicht fest auf Low-Pegel ist und VT1 nicht mehr voll durchsteuert, kann die nun geringere Gate-Ladung schneller abfließen, sodass die Reaktion von  $U_A$  auf die Ausschaltflanke (Verlauf *b*) jetzt wesentlich schneller als in Bild A3 erfolgt. Dafür geschieht das Einschalten etwas träger (Verlauf *d*), außerdem ist ein gedämpftes Regelschwingen erkennbar.  $120\text{ }\mu\text{s}$  nach dem Einschalten ist der auf  $I_{\text{max}}$  begrenzte Ausgangsstrom konstant.

### ■ Messung 5: Verhalten mit Strombegrenzung und kleinem Kondensator am Ausgang

Messbedingungen beim Schalten mit Strombegrenzung und kleinem Kondensator am Ausgang:  $U_E = 25\text{ V}$ ,  $C_E = 470\text{ }\mu\text{F}$ ,  $C_A = 47\text{ }\mu\text{F}$  (Vielschicht-Keramikkondensator),  $R_{\text{Last}} = 11\text{ }\Omega$

Wie in Bild A4 stellt sich bei eingeschaltetem Modul eine stabile Ausgangsspannung ein, weil die Strombegrenzung aktiv ist. Der Abklingverlauf ist erwartungsge-

Bild A3:  
Ein- und  
Ausschalten ohne  
Strombegrenzung

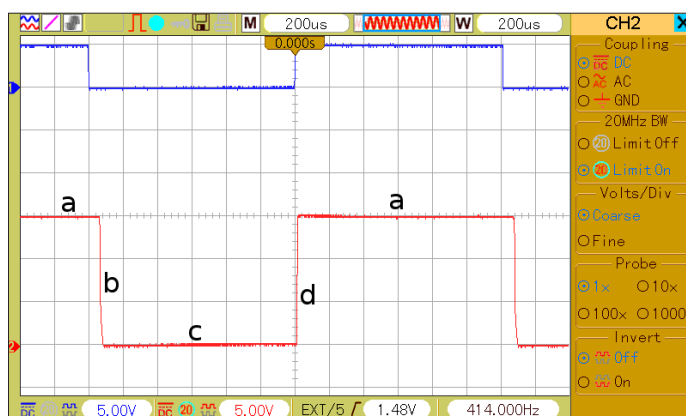


Bild A4:  
Ein- und  
Ausschalten mit  
Strombegrenzung

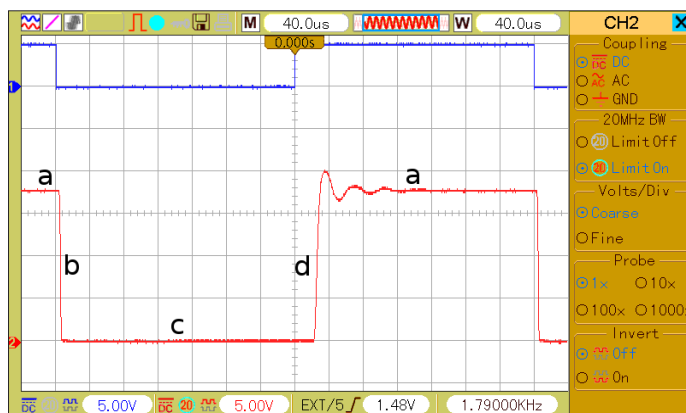
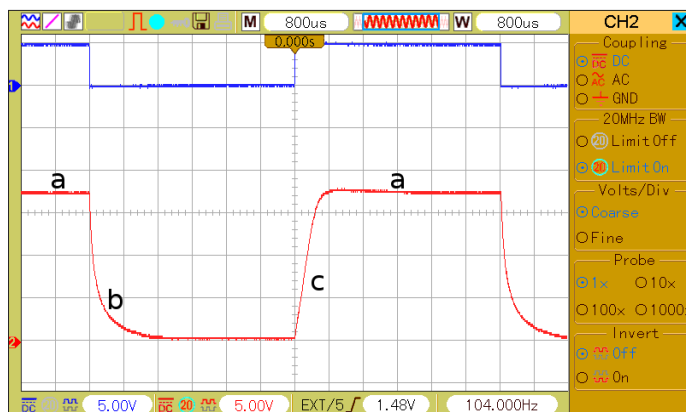


Bild A5:  
Ein- und  
Ausschalten mit  
Strombegrenzung  
und  $47\text{ }\mu\text{F}$  am  
Ausgang



mäß träger, denn nach dem Ausschalten des Moduls wird  $R_{\text{Last}}$  noch kurzzeitig von  $C_A$  gespeist. Die Entladezeitkonstante von  $\tau = 11\text{ }\Omega \cdot 47\text{ }\mu\text{F} = 0,517\text{ ms}$  widerspiegelt sich im Verlauf *b*. Nach dem erneuten Einschalten lädt der Konstantstrom  $I_{\text{max}}$  den Ausgangskondensator  $C_A$  fast linear auf, wobei ein zunehmender Stromanteil jedoch in  $R_L$  fließt. Daraus resultiert die Abrundung am Ende des Verlaufes *c*, bevor sich abermals entsprechend  $I_{\text{max}} \cdot R_{\text{Last}}$  der stationäre Endwert von  $U_A = 17,6\text{ V}$  einstellt.

emmmf@gmx.de