

Transistoren als Schalter

Anwendungsschaltungen mit dem Prototypenadapter-Professional-Experimentierset PAD-PRO-EXSB

Teil 10

In diesem Teil unserer Serie zum PAD-PRO-EXSB beschäftigen wir uns mit Transistoren und der spannenden Frage, wie sich diese als Schalter einsetzen lassen. Dabei geht es insbesondere um die Auswahl der passenden Schaltungstechnik und die richtige Dimensionierung der Bauteile.

Transistoren im Einsatz: Verstärker, Schalter, Basis der Halbleitertechnologien

Transistoren waren Ausgangspunkt für die Entwicklung von Halbleitertechnologien und bilden die Grundlage für moderne Halbleiterbausteine wie z. B. Mikroprozessoren. Transistoren sind einfach zu handhaben und können als Verstärker oder als Schalter verwendet werden.

Wir zeigen in diesem Artikel, wie Sie Transistoren als Schalter nutzen können und was dabei zu beachten ist. Als Plattform zum Aufbau der Schaltungen dient das Bauteileset [PAD-PRO-EXSB](#) und ein Experimentierboard wie das [EXSB1](#), das [EXSB-Mini \(Bausatz oder Fertiggerät\)](#) oder ein gewöhnliches Steckboard.

Die Schaltungen können natürlich auch mit handelsüblichen Bauteilen auf Steckboards oder Loch-

rasterplatten nachgebaut werden. Da es sich um eine Experimentierschaltung und nicht um eine praxisorientierte Schaltung handelt, sollten vorzugsweise Steckboards verwendet werden.

Transistoren – Grundlagen

Zunächst wollen wir uns mit den Grundlagen der Transistoren beschäftigen. Wir unterscheiden zwei wichtige Technologien:

1. Bipolare Transistoren (BJT, Bipolar Junction Transistor), die in NPN- und PNP-Typen unterteilt sind
2. Unipolare MOSFET-Transistoren, die in N-Kanal- und P-Kanal-Typen gegliedert werden

Um die Funktionsweise von Transistoren auf einfache Weise zu erklären, verzichten wir auf detaillierte physikalische Eigenschaften, stattdessen erklären wir, wie ein Transistor elektrisch funktioniert. Wenn man sich Erklärungen in Lehrbüchern anschaut, wird zwischen

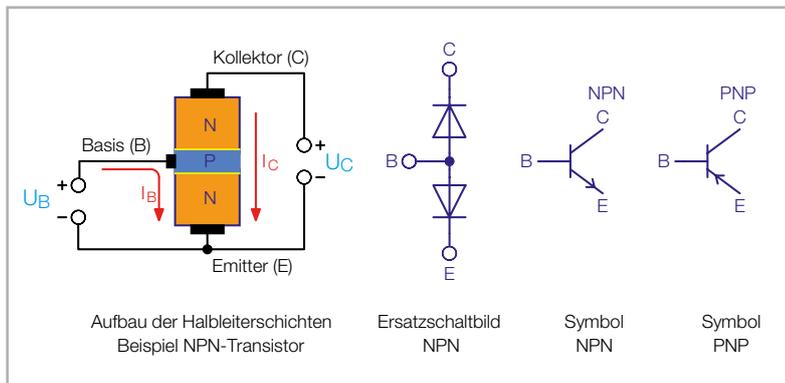


Bild 1: Aufbau der Halbleiterschichten und Schaltsymbole eines BJT-Transistors

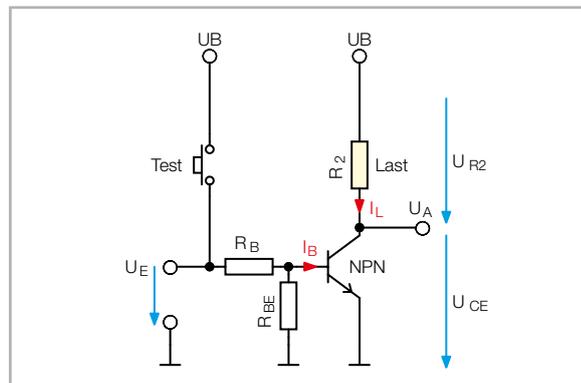


Bild 2: Grundsaltung eines NPN-Transistors

der technischen und der physikalischen Stromrichtung unterschieden. Zum besseren Verständnis beschränken wir uns auf die technische Stromrichtung, also von plus nach minus. Im Folgenden behandeln wir die beiden Transistorgrundtypen getrennt.

Bipolartransistor

Bild 1 zeigt am Beispiel eines NPN-Transistors den Aufbau der einzelnen Halbleiterschichten. Es gibt immer drei Schichten aus Halbleitermaterial, die übereinander angeordnet sind. Somit ergeben sich zwei PN-Übergänge. Die obere Schicht (Kollektor) und untere Schicht (Emitter) bestehen aus einem negativ dotierten N-Material und sind durch eine dünne Schicht P-Material (Basis) getrennt. Wenn eine positive Spannung an den Kollektor und eine negative Spannung an den Emitter angelegt wird und die Basis positiv gegenüber dem Emitter ist, wird der Transistor leitend und es fließt ein Strom (technische Stromrichtung) vom Kollektor zum Emitter. Der Strom zwischen Kollektor und Emitter wird durch einen viel geringeren Basisstrom gesteuert. Eine der wichtigen Kenndaten eines Transistors ist der Verstärkungsfaktor eines Transistors, der als Stromverstärkungsfaktor (hFE) bezeichnet wird. Dieser Faktor beschreibt das Verhältnis zwischen dem Kollektorstrom (I_C) und dem Basisstrom (I_B). Mathematisch wird dies ausgedrückt als:

$$I_C = hFE \times I_B$$

Ein Universaltransistor wie ein BC847, hat einen Verstärkungsfaktor (hFE) von 200 bis 600 (je nach Kennbuchstabe A, B oder C hinter der Typenbezeichnung). Ein hFE von 600 würde z. B. bedeuten, dass ein Basisstrom von 0,1 mA einen Kollektorstrom von 60 mA generieren könnte.

Wie man sieht, ist der Transistor ein Stromverstärker, bei dem die Basis mit einem Strom angesteuert wird. Aus diesem Grund wird in der Regel immer ein Basisvorwiderstand vor die Basis geschaltet. Der Verstärkungsfaktor hFE spielt eine entscheidende Rolle bei der Berechnung der Dimensionierung eines Schalttransistors, wie wir später sehen werden. In Bild 2 ist eine Grundsaltung für einen NPN-Transistor dargestellt. Wird der im Schaltbild gezeigte Taster (Test) betätigt, fließt ein Strom durch die Basis des Transistors, wodurch dieser leitend wird und ein Strom vom Kollektor zum Emitter fließt.

Der Widerstand R_{BE} ist sehr wichtig, um die Basis auf einen definierten Pegel im Ruhezustand zu legen. Ohne diesen Widerstand „floatet“ der Eingang und hat keinen definierten Bezugspunkt. Wie aus dem Ersatzschaltbild des Transistors in Bild 1 ersichtlich ist, hat die Basis-Emitter-Verbindung eine Dioden-Charakteristik. Wenn ein ausreichender Strom von der Basis zum Emitter fließt, stellt sich bei einem Siliziumtransistor eine Spannung von etwa 0,7 V ein.

Dies zeigt sich auch deutlich in der Eingangskennlinie (Bild 3, rechts). In diesem Bild ist auch das Ausgangskennlinienfeld (links), das den Kollektorstrom (I_C) in Abhängigkeit von der Ausgangsspannung (Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE}) bei

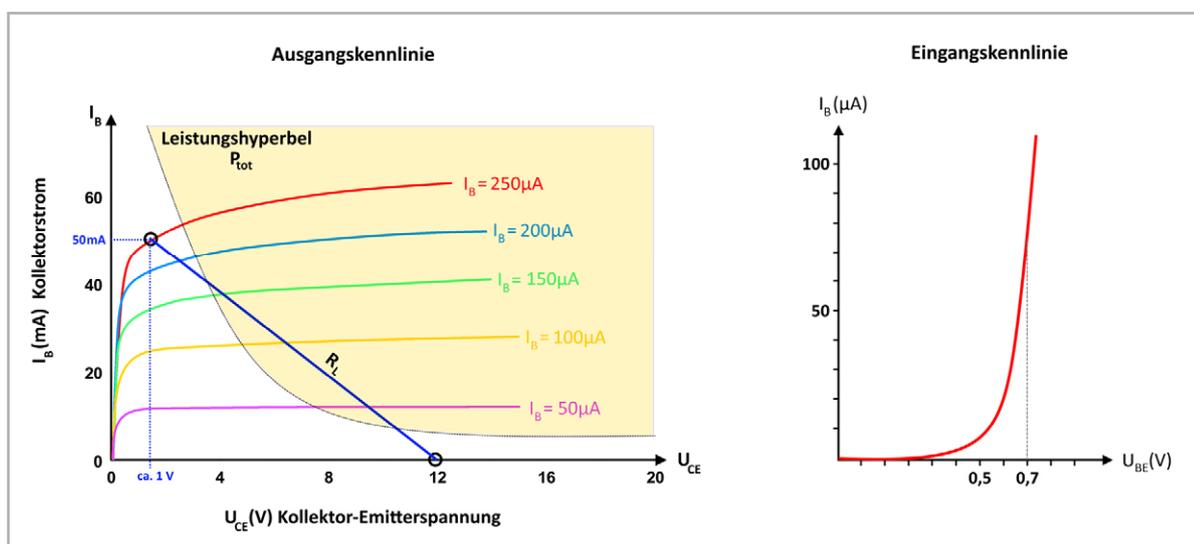


Bild 3: Kennlinien eines NPN-Transistors

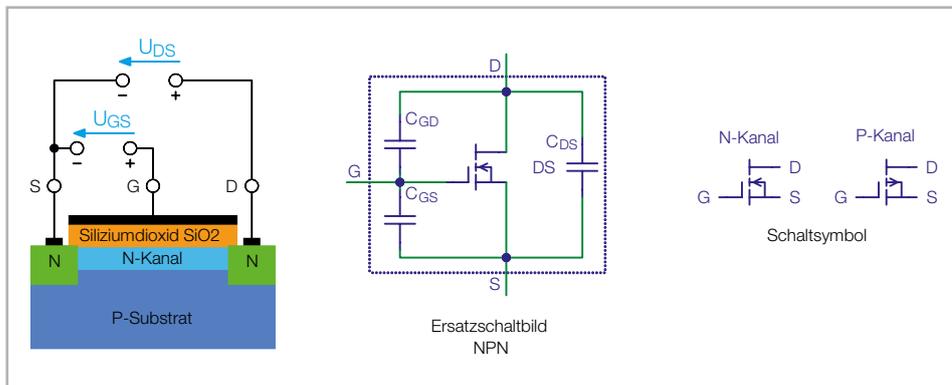


Bild 4: Aufbau der Halbleiterschichten und Schaltsymbole eines MOSFET-Transistors

verschiedenen Basisströmen darstellt, enthalten. Schauen wir uns den Kollektorstrom bei einem konstanten Basisstrom von z. B. $50 \mu\text{A}$ an. Man erkennt, dass ab einer bestimmten Spannung U_{CE} der Kollektorstrom nicht weiter ansteigt. Der Transistor befindet sich damit im Sättigungsbereich. Dieser Sättigungswert ist für unterschiedliche Basisströme dargestellt. Interessant für uns ist jedoch die blaue Gerade, die den Strom- und Spannungsverlauf an einem Kollektorwiderstand (R_L) zeigt. Mehr hierzu im Abschnitt „Transistor als Schalter“.

MOSFET-Transistor

Ein MOSFET-Transistor (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) beruht auf dem Prinzip des Feldeffekts, d. h. der Steuerung des Stromflusses durch ein elektrisches Feld. Bild 4 zeigt den Aufbau der Halbleiterschichten eines MOSFET-Transistors. Wir behandeln hier nur den Anreicherungstyp, d. h. den selbstsperrenden Typ (engl. Enhancement-Type), erkennbar an der gestrichelten Linie zwischen Drain (D) und Source (S). Es gibt auch den Verarmungstyp (engl. Depletion-Type), der in der Praxis jedoch selten anzutreffen ist.

Zwischen den Anschlüssen Drain und Source befindet sich ein sogenannter „Kanal“ wie in Bild 4 dargestellt. Drain und Source sind vergleichbar mit Kollektor und Emitter eines Bipolartransistors. Das Gate liegt isoliert über dem Kanal. Die Spannung am Gate erzeugt ein elektrisches Feld, das den Stromfluss zwischen Drain und Source steuert.

Im Gegensatz zum bipolaren Transistor erfolgt die Steuerung nicht über den Strom, sondern über die Spannung am Gate. Wenn keine Spannung am Gate anliegt (Gate = 0 V), gibt es keinen leitenden Kanal zwischen Source und Drain. Es gibt keine Elektronen, die den Strom transportieren können – der Transistor ist gesperrt. Wird am Gate eine positive Spannung angelegt (bezogen auf den N-Kanal-Typ), entsteht ein elektrisches Feld, das Elektronen aus dem Source-Bereich in den Bereich unter dem Gate zieht. Dadurch entsteht ein leitender Elektronenkanal zwischen Source und Drain, wodurch ein Strom fließen kann. Je nach Höhe der Gate-Spannung ändert sich der Widerstand zwischen Drain und Source. Damit der MOSFET zu leiten beginnt, muss die Gate-Spannung eine bestimmte Spannung $U_{GS, \text{min}}$ überschreiten. Diese Spannung ist je nach Typ unterschiedlich und im Datenblatt der Hersteller als $U_{GS, \text{Threshold}}$ (Schwellspannung) angegeben.

Das Ersatzschaltbild in Bild 4 zeigt, dass das Gate im Prinzip einen Kondensator zwischen Source und Drain darstellt. Es fließt kein Strom in das Gate, sodass die Ansteuerung nahezu leistungslos ist. Lediglich zum Laden und Entladen des Gate-Kondensators wird etwas Energie benötigt. Die Ausgangskennlinie in Bild 6 zeigt das Verhältnis der Drain-Source-Spannung U_{DS} zum Drain-Strom I_D bei unterschiedlichen Gate-Spannungen U_{GS} . Ab einer gewissen Spannung U_{DS} steigt der Drain-Strom nicht weiter an und der Transistor befindet sich in der Sättigung (dargestellt als Sättigungsbereich). Umgekehrt gibt es auch einen Bereich, in dem der Transistor im Linearbetrieb (Spannungsverstärker) arbeitet. MOSFETs gibt es als N-Kanal und P-Kanal, wobei die

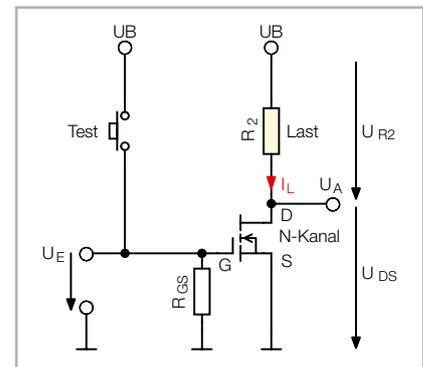


Bild 5: Grundsaltung eines N-Kanal-MOSFET-Transistors

Funktion identisch ist, nur die Polarität der Versorgungsspannung ist in diesem Fall unterschiedlich. Der Widerstand zwischen Drain und Source im eingeschalteten Zustand wird in den Datenblättern als $R_{DS(on)}$ bezeichnet (siehe Tabelle 2). Dieser Widerstand ist relativ klein, wodurch auch relativ wenig Spannung abfällt und der Transistor wenig Verlustleistung erzeugt, was ihn für Schaltanwendungen sehr beliebt macht.

Nachfolgend einige Hinweise zu der in Bild 5 dargestellten Grundsaltung. Mit der Taste „Test“ wird eine Spannung an das Gate des Transistors angelegt, die einer Spannung U_E am Gate entspricht. Der Transistor wird leitend und es fließt ein Strom (I_C) von Drain nach Source. Die Last, dargestellt durch den Widerstand R_L , wird mit Spannung versorgt, sobald eine Spannung am Gate angelegt wird. Der Widerstand R_{GS} ist erforderlich, um den internen Gate-Kondensator zu entladen, damit der Transistor wieder sperrt. Hier wird ein Problem bei der Ansteuerung von MOSFETs deutlich, denn der „Gate-Kondensator“ sollte relativ schnell aufgeladen, aber ebenso schnell auch wieder entladen werden. In unserer Grundsaltung wird über den Taster „Test“ das Gate sehr schnell aufgeladen und über den Widerstand R_{GS} entladen. In Bild 7 sind die Lade- und Entladekurven dargestellt. Flache Lade- bzw. Entladekurven am Gate bedeuten, dass der Transistor während dieser Zeit im Linearbetrieb arbeitet. Dies führt zu einer höheren Verlustleistung des Transistors und gilt sowohl für den MOSFET- als auch für den Bipolartransistor.

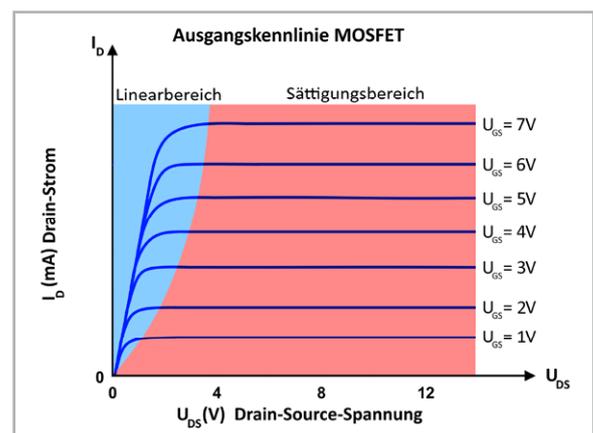


Bild 6: Ausgangskennlinie eines N-Kanal-MOSFET-Transistors

Bild 7: Schaltzeiten bei einem MOSFET-Transistor als Schalter

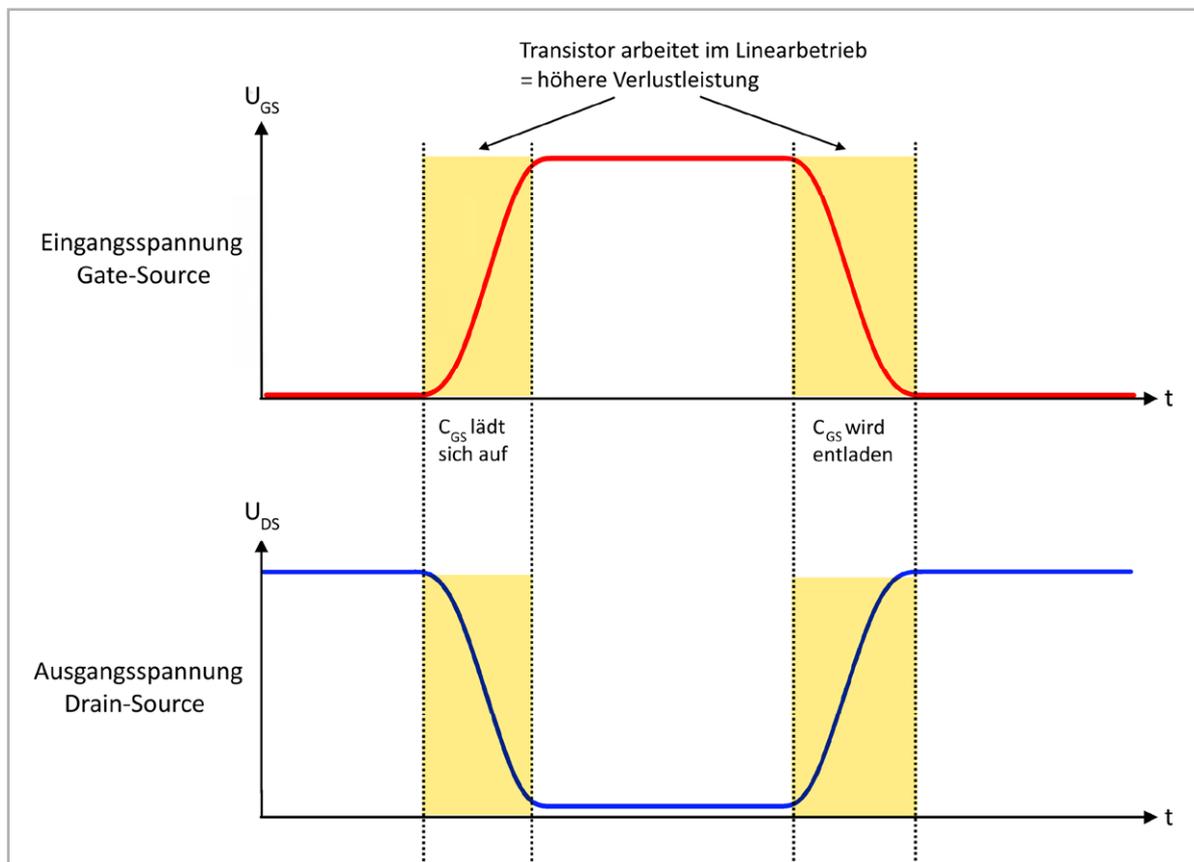


Tabelle 1

Vergleich MOSFET vs. BJT

Eigenschaft	BJT	MOSFET
Ansteuerung	Steuerung durch Basisstrom	Steuerung durch Gate-Spannung
Eingangsimpedanz	relativ niedrig	sehr hoch
Rauschverhalten	geringer Rauschpegel	höherer Rauschpegel
Schaltgeschwindigkeit	relativ langsam	sehr schnell, hoher Schaltdurchsatz
Anwendungen	Analogtechnik, Verstärker	digitale Logik und Leistungsschaltungen

Bei der Auswahl des richtigen Transistortyps für die eigene Anwendung spielt der individuelle Anwendungsfall eine wichtige Rolle. Für analoge Verstärkerschaltungen und einfache Schaltaufgaben sind „normale“ Bipolartransistoren die beste Wahl. Für reine Schaltaufgaben und vor allem bei höheren Schaltströmen sollte ein MOSFET verwendet werden, da die Verlustleistung wesentlich geringer ist und somit auf eine Kühlung des Transistors verzichtet werden kann. Für unsere Aufgabenstellung „Transistor als Schalter“ hilft folgende Faustformel: bei Schaltströmen unterhalb von 1A können Sie einen Bipolartransistor verwenden, oberhalb von 1A ist hingegen ein MOSFET vorzuziehen. In **Tabelle 2** sind gebräuchliche Transistoren im SOT23-Gehäuse, also für kleine bis mittlere Leistungen, dargestellt.

Vergleich MOSFET vs. BJT

Nachdem wir uns mit den grundlegenden Funktionen der beiden Transistortypen beschäftigt haben, wollen wir nun die Unterschiede sowie die Vor- und Nachteile der beiden Transistortypen betrachten. In **Tabelle 1** sind die wichtigsten Kenndaten dazu dargestellt.

Tabelle 2

Technische Daten gängiger Transistoren

Typ	BC847C	BC857C	IRLML2502	μPA1918*
Technologie	bipolar (BJT)	bipolar (BJT)	MOSFET	MOSFET
CM-Bezeichnung	CM-TB-BC847C-A	CM-TB-BC857C-A	CM-TF-IRLML2502-A	CM-TF-uPA1918-A
Technologie	NPN	PNP	N-Kanal-MOSFET	P-Kanal-MOSFET
Betriebsspannung U _{CE} /U _{DS}	45 V	45 V	20 V	20 V
Strom I _C /I _D	100 mA	100 mA	3 A	3,7 A
R _{DS(on)}	–	–	0,045 Ω	0,19 Ω
Frequenz (f _g)	300 MHz	300 MHz	1 MHz	1 MHz
Verstärkung h _{FE}	600	600	–	–
U _{GS} Threshold	–	–	0,6-1,2 V	-1,5 bis -2,5 V
PTOT	0,25 W	0,25 W	0,8 W	2 W
Besonderheiten	Universal-Bipolartransistor Audio, HF und Sensorik		MOSFET-Schalttransistoren	
Datenblatt (Link)	Datenblatt	Datenblatt	Datenblatt	Datenblatt

* nicht im PAD-PRO-EXSB enthalten

Anwendungsbeispiele für Transistoren als Schalter

Die Ansteuerung bzw. der Arbeitspunkt eines Transistors entscheidet darüber, ob der Transistor im Schalter- oder Linearbetrieb (analoger Verstärker) arbeitet. Im Schalterbetrieb sollte ein Bipolartransistor grundsätzlich immer übersteuert werden. Beim MOSFET hingegen reicht das Überschreiten der minimalen U_{GS} aus, um den Transistor sicher durchzuschalten.

Im Folgenden zeigen wir einige Anwendungsbeispiele für den Einsatzzweck „Transistor als Schalter“. In **Bild 8** sind hierzu einige Beispiele für beide Transistortypen dargestellt. Schauen wir uns zunächst die beiden oberen Schaltungen für den Bipolartransistor an (**Bild 8a und 8b**). Hier wurde gegenüber der Grundschialtung aus **Bild 2** die Last durch eine LED bzw. ein Relais ersetzt. Da der NPN-Transistor über den Strom gesteuert wird, gilt es, den richtigen Basiswiderstand zu wählen bzw. zu berechnen.

Wir wissen, dass der Transistor einen definierten Stromverstärkungsfaktor hat (siehe **Tabelle 2**). Wir nehmen an, die Last hat einen Stromverbrauch von 30 mA (z. B. das Relais). Teilt man diesen Strom durch den Stromverstärkungsfaktor h_{FE} , erhält man den notwendigen minimalen Basisstrom (I_{Bmin}). Damit der Transistor sicher durchschaltet, wird er mit einem sogenannten Übersteuerfaktor \ddot{u} multipliziert. So ist sichergestellt, dass der Transistor übersteuert und in die Sättigung geht. Für den Übersteuerungsfaktor \ddot{u} wird in der Regel ein Wert zwischen 5 und 10 verwendet. Hier die Berechnung an einem Beispiel mit einer Last von 30 mA, wie in **Bild 9** dargestellt.

$$I_C = h_{FE} \times I_B$$

$$I_{B \min.} = \frac{I_C}{h_{FE}} \quad \text{Beispiel: } I_B = \frac{30 \text{ mA}}{600} = 0,050 \text{ mA} = 50 \mu\text{A}$$

$$I_B = \ddot{u} \times I_{B \min.} \quad \text{Beispiel: } I_B = 0,05 \text{ mA} = 10 \times 0,5 \text{ mA}$$

$I_{B \min.}$ = minimaler Basisstrom
 I_B = errechneter Basisstrom
 \ddot{u} = Übersteuerungsfaktor

Mit der Kenntnis des erforderlichen Basisstroms und des Spannungsabfalls über der Basis-Emitter-Strecke kann der Vorwiderstand berechnet werden. Wir nehmen an, dass die Eingangsspannung U_E 0 bis 5 V entspricht. Den Widerstand R_{BE} vernachlässigen wir in unserer Berechnung, da dieser in der Praxis relativ groß gewählt wird (ca. 220 k Ω bis 1 M Ω) und wenig Einfluss auf die Berechnung hat. Um den Widerstand R_B berechnen zu können, benötigen wir nach dem ohmschen Gesetz die Spannung, die über dem Widerstand U_{RB} abfällt, sowie den Strom I_B . Die Berechnung sieht dann folgendermaßen aus:

$$U_{RB} = U_E - U_{BE} = 5 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 4,3 \text{ V}$$

$$R_B = \frac{U_E - U_{BE}}{I_B} = \frac{5 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{0,5 \text{ mA}} = \frac{4,3 \text{ V}}{0,5 \text{ mA}} = 8600 \Omega \approx 8,6 \text{ k bis } 10 \text{ k (E12)}$$

R_B = Basiswiderstand
 U_{BE} = Spannung Basis – Emitter ca. 0,7 V
 U_{RB} = Spannungsabfall über R_B
 U_E = Eingangsspannung (Beispiel 5 V)

Wir erhalten also einen errechneten Basiswiderstand von 8600 Ω . Da dies ein recht „krummer“ Wert ist, nehmen wir den nächstliegenden Widerstand der Reihe E12, und zwar 8,2 k Ω oder 10 k Ω .

Wenn die Last z. B. aus einer LED mit einem Strom von ca. 30 mA oder darunter besteht, können Sie als Standardwert immer einen Widerstand von ca. 10 k Ω nehmen und sind damit immer auf der sicheren Seite (siehe **Bild 8a und 8b**).

Bei einem MOSFET ist kein Gate-Vorwiderstand erforderlich, da kein Strom in das Gate fließt. Beispiele mit einem N-Kanal-MOSFET sind in **Bild 8c und 8d** zu sehen.

Die Dimensionierung des Widerstands R_{GS} ist eine Entscheidung zwischen dem Stromverbrauch der Steuerschaltung und der Schaltgeschwindigkeit des Transistors. Die Kapazität am Gate (kann einige nF betragen) sollte möglichst schnell entladen werden, was durch einen entsprechend kleinen Widerstand erreicht wird. Hierdurch steigt allerdings auch die Stromaufnahme, denn bei einem High-Signal am Gate muss der zusätzliche Strom durch den Widerstand R_{GS} berücksichtigt werden. Bei einer Steuerspannung von 5 V und einem R_{GS} von 1 k Ω fließen 5 mA durch den Widerstand R_{GS} . Dies stellt für die Steuerelektronik, die den Strom liefern muss, im Allgemeinen kein Problem dar. Wenn Sie mit einem MOSFET jedoch hohe Lasten schalten wollen und zudem noch mit einer relativ hohen Schaltfrequenz, z. B. mit einer PWM (Pulsweitenmodulation) ansteuern, können hohe Verlustleistungen auftreten.

Um ein schnelles Schalten des Transistors bei hoher Schaltleistung zu ermöglichen, ist eine spezielle Ansteuerungstechnik notwendig. **Bild 10** zeigt eine sogenannte Push-Pull-Treiberschaltung. Die deutsche Übersetzung für Push-Pull wäre „drücken“ und „ziehen“ und beschreibt das beschleunigte Laden und Entladen des Gate-Kondensators. Wie in **Bild 10** zu sehen, wird der Ladestrom über den Transistor Q2 und der Entladestrom über Q3 geschaltet. Angesteuert werden die beiden Transistoren von einem weiteren Transistor Q1. Auf diese Weise verkürzen sich die Lade- und Entladezeiten, das Gate wird sehr schnell umgeladen und die Schaltflanken werden kürzer. Dies minimiert zudem die Verlustleistung. Solche Push-Pull-Treiber kann man diskret aufbauen oder einen fertigen integrierten Schaltkreis verwenden.

Hinweise zum Betrieb mit Relais

Bild 8 zeigt Anwendungsbeispiele mit einem Relais. Die parallel zum Relais geschaltete Diode, auch Freilaufdiode genannt, erfüllt eine Schutzfunktion. Die Erregerwicklung des Relais erzeugt beim Abschalten negative Spannungsspitzen (bedingt durch Selbstinduktion). Diese können im schlimmsten Fall den Schalttransistor zerstören. Um die Spannungsspitzen zu vermeiden, wird eine Schutzdiode parallel zur Relaiswicklung geschaltet. Die Diode ist in Sperrrichtung geschaltet, nur bei einer negativen Spannung wird die Diode leitend und begrenzt so die Induktionsspannung.

Im Set vom PAD-PRO-EXSB ist ein fertiges Relaismodul mit integriertem Schalttransistor vorhanden (siehe **Bild 11**). Eine detaillierte Beschreibung finden Sie in Teil 1 dieser Serie (siehe Übersicht am Ende dieses Beitrags).

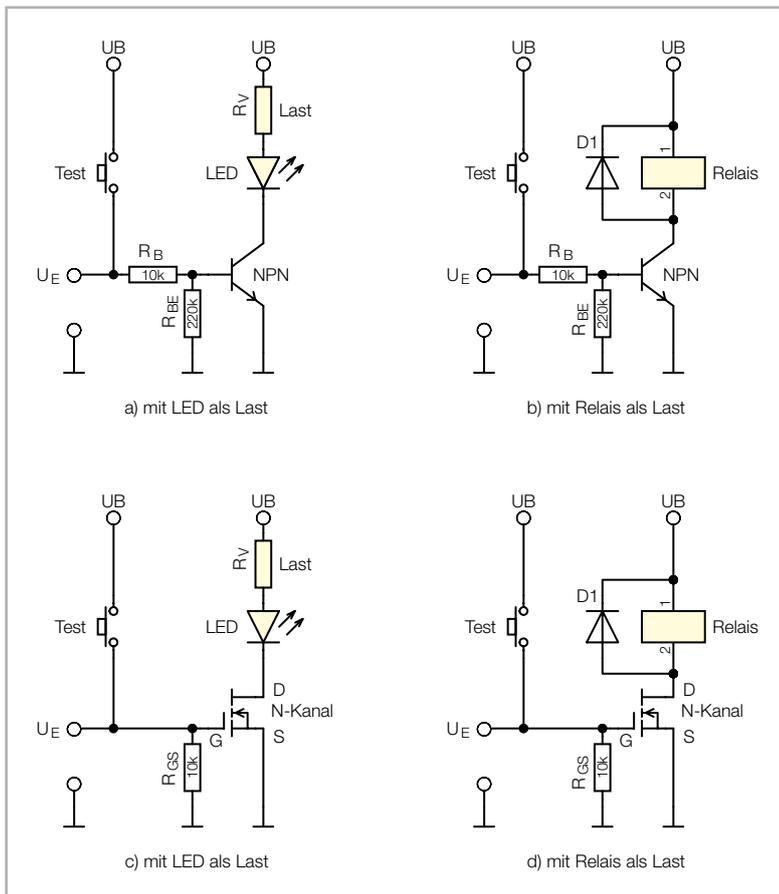


Bild 8: Grundschaltungen mit LED oder Relais als Last

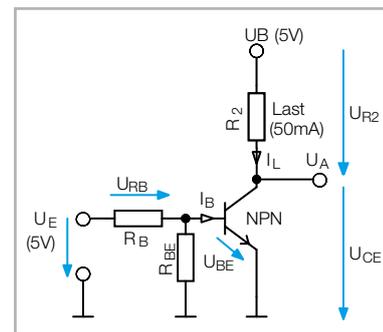


Bild 9: Grundschaltungen zur Berechnung von R_B

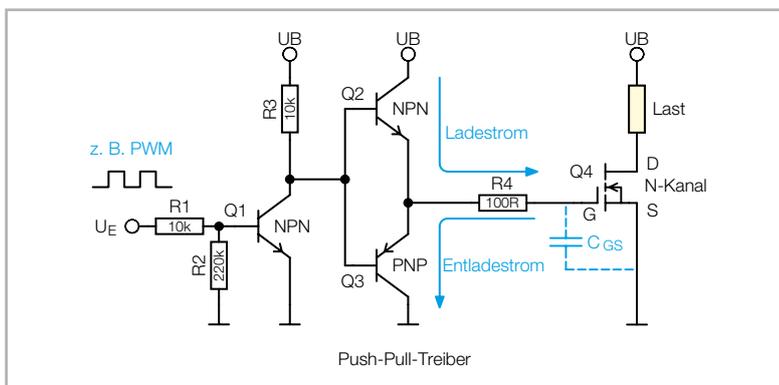


Bild 10: Push-Pull-Treiberschaltung

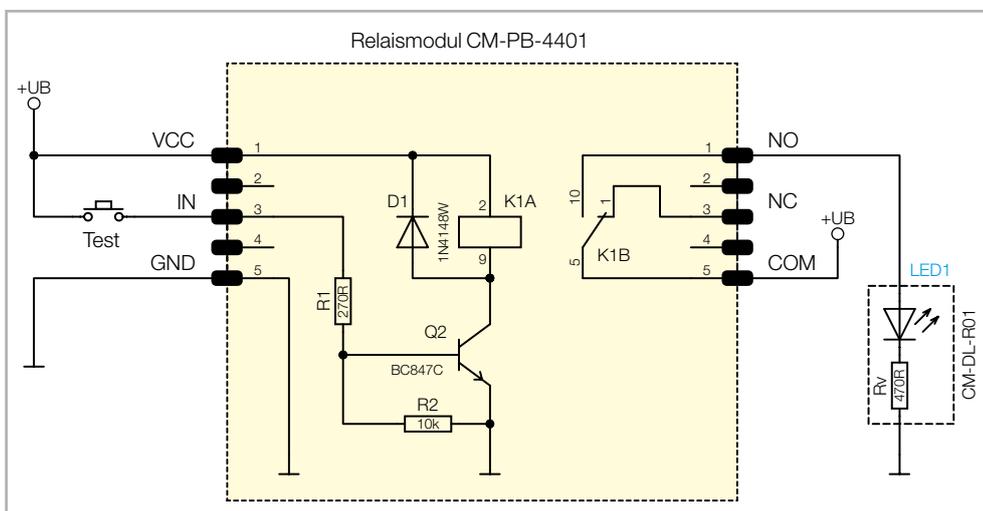


Bild 11: Fertiges Relaismodul aus dem PAD-PRO-EXSB-Set

Mit diesem Relaismodul sparen Sie sich den Aufbau der Treiberstufe. **Bild 18 und Bild 19** zeigen den Aufbau auf einem Steckboard mit zugehörigem Verdrahtungsplan. Mit dem Taster wird testweise ein High-Signal auf den Steuereingang IN gelegt. Zur Kontrolle, ob das Relais auch schaltet, ist als Verbraucher eine LED an die Schaltkontakte angeschlossen. Im Abschnitt „Nachbau der Beispielschaltungen“ finden Sie einen Nachbauvorschlag für diese Testschaltung mit Relais.

Betriebsspannung mit Transistoren schalten

Ein weiterer Anwendungsfall für den Schalttransistor ist das Schalten einer Versorgungsspannung. Dieser Anwendungsfall kommt vor, wenn die Versorgungsspannung einer Schaltung elektronisch geschaltet werden soll, wie es häufig in mikroprozessorgesteuerten Schaltungen der Fall ist.

Der Einsatz ist sinnvoll, wenn Sie z. B. mit einem Taster das Gerät ein- bzw. ausschalten wollen. Bei den bisherigen Schaltungsbeispielen wurde die Last mit einem Schalttransistor gegen Masse geschaltet, was auch als Low-Side-Schalter bezeichnet wird. Bei Schalten einer Betriebsspannung wird hingegen ein High-Side-Schalter verwendet, wie in **Bild 12** dargestellt. Hier liegt der Verbraucher mit einer Seite gegen Masse, während über den Schalttransistor (Q2) die Versorgungsspannung zugeschaltet wird. Um die Ansteuerung einfacher zu gestalten, wird ein zusätzlicher Transistor (Q1) benötigt, der die Basis von Q2 nach Masse schaltet und mit einer positiven Spannung angesteuert wird. In **Bild 12** sind beide Varianten für BJT und MOSFET dargestellt.

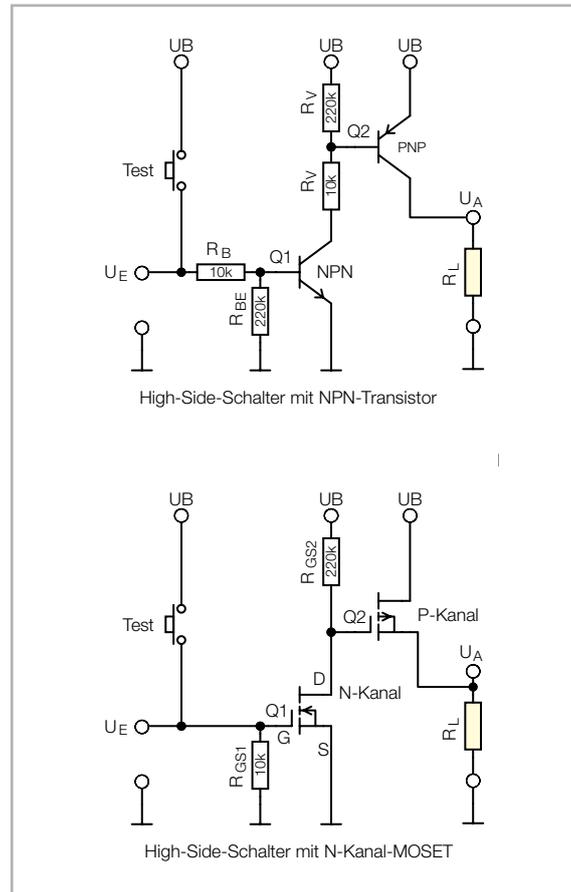


Bild 12: Grundsaltungen für High-Side-Schalter

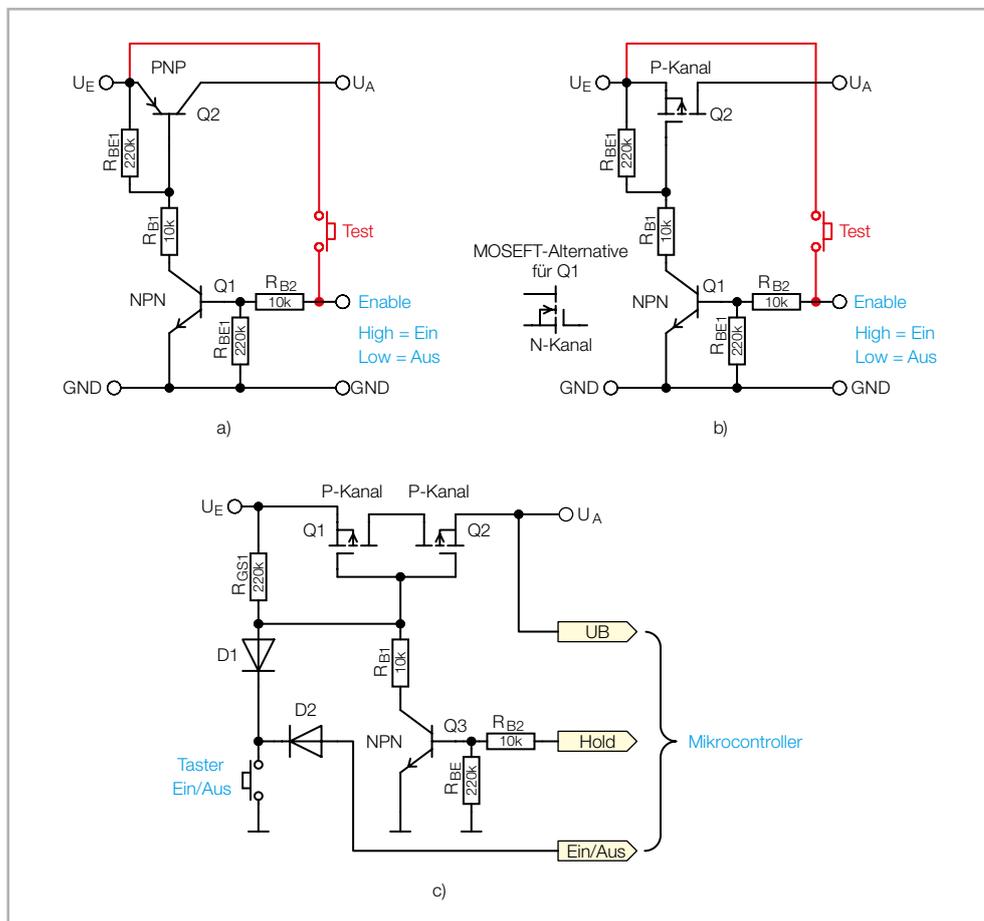


Bild 13: Praxisorientierte Grundsaltungen für High-Side-Schalter

In [Bild 13](#) sind beide Grundsaltungen noch einmal etwas anders dargestellt. So erkennen Sie eine praxisorientierte Schaltung leichter wieder, die Sie z. B. schon einmal in Schaltbildern gesehen haben. [Bild 13c](#) zeigt den Ausschnitt einer fertigen Schaltung aus dem Schaltbild des LED-Testers [LED-T2](#). Die Funktionsweise im Zusammenspiel mit einer Steuerung durch einen Mikrocontroller wollen wir uns im Detail anschauen.

Statt eines P-Kanal-Transistors wie im Beispiel b werden hier zwei Transistoren (Q1 und Q2) hintereinandergeschaltet. Dies hat den Grund, dass eine Spannung auf der Ausgangsseite (z. B. aufgeladener ELKO) nicht mehr auf den Eingang gelangen kann. Im Beispiel b kann über die interne Body-Diode (im Schaltsymbol nicht erkennbar) Strom auf den Eingang zurückfließen. Dieser Effekt ist unter Umständen nicht erwünscht.

Die drei Anschlüsse (Ub, Hold und Ein/Aus) führen zum Mikrocontroller, der an die Ausgangsspannung UA angeschlossen ist. Der Einschaltvorgang läuft wie folgt ab:

Durch Betätigen des Tasters „Ein/Aus“ werden über die Diode D1 die zusammengesetzten Gates der beiden Transistoren (Q1, Q2) auf Massepotential gelegt, wodurch diese durchschalten und die Eingangsspannung UE zum Ausgang UA leiten. Sobald der Mikrocontroller mit Spannung versorgt wird, gibt dieser ein High-Signal auf den PORT „Hold“ (muss in der Firmware programmiert werden). Über den Widerstand RB2 wird der Transistor Q3 angesteuert, der wiederum die beiden Gates der Transistoren Q1 und Q2 auf Masse zieht und die Spannungsversorgung zum Ausgang aufrechterhält.

Der ganze Vorgang dauert nur wenige Millisekunden, sodass ein kurzer Tastendruck ausreicht, um diese Selbsthaltung zu aktivieren. Solange der Controller das Signal „Hold“ aufrechterhält, bleibt die Versorgungsspannung bestehen. Zum Ausschalten muss dem Mikrocontroller mitgeteilt werden, dass eine Abschaltung erwünscht ist und das Signal „Hold“ auf Low-Potential gelegt werden soll. Diese „Mitteilung“ erfolgt über einen erneuten Tastendruck.

Über die Diode D2 wird der Ausgang „Ein/Aus“, der vom Controller über einen Pull-up-Widerstand auf High gehalten wird, kurzzeitig auf Massepotential gelegt. Der Controller erkennt diesen Pegelwechsel und das Signal „Hold“ wird deaktiviert, sodass die Selbsthaltung gelöst

und die Spannungszufuhr unterbrochen wird. Je nach Firmware-Programmierung kann damit auch ein automatisches Abschalten (Auto-Power-off) implementiert werden.

Nachbau der Beispielschaltungen

Für einige der hier vorgestellten Grundsaltungen gibt es Aufbauvorschläge mit dem Experimentierset PAD-PRO-EXSB. Zum Set, das alle notwendigen Bauteile enthält, wird zusätzlich noch eine Aufbauplattform benötigt. Dies kann die Experimentierplattformen EXSB1, das EXSB-Mini oder ein „normales“ Steckboard sein. Die Kontakte der Steckboards sind in der Regel nummeriert: Spalten von links nach rechts mit 1 bis 63 und die Reihen mit den Buchstaben A bis F. Dies kann sich je nach Hersteller geringfügig unterscheiden. Anhand der Nummerierung kann man die Position der Bauteile und Brücken in den Bildern abzählen und auf die eigene Schaltung übertragen.

WICHTIG: Das Steckboard muss so platziert werden, dass sich Pin 1 auf der rechten Seite befindet. Ist das Steckboard andersherum gedreht, stimmen die Positionen nicht mehr mit den Bildern überein.

Die elektrischen Verbindungen werden mit starren und flexiblen Steckbrücken hergestellt, die im Experimentierset enthalten sind. [Bild 15](#) zeigt den Verdrahtungsplan für die beiden Grundsaltungen aus [Bild 8a](#) und [8c](#). Entsprechende Fotos von Aufbauten auf einem Steckboard bzw. EXSB-Mini sind in [Bild 16](#) und [Bild 17](#) zu sehen. Auch für die Relais-Testschaltung aus [Bild 11](#) gibt es Hinweise für den Aufbau ([Bild 18](#) bis [Bild 20](#)).

Versorgungsspannung

Die Spannungsversorgung für die dargestellten Schaltungen sollte 5 V betragen. Für das universelle Steckboard kann man auf unterschiedliche Spannungsversorgungen zurückgreifen ([Bild 14](#)).

Über eine USB-Buchse kann ein Steckernetzteil oder ein Ladegerät mit Micro-USB-Stecker als Spannungsquelle genutzt werden.

Die Variante mit einer Klemmleiste dient zum Anschluss einer externen Spannungsversorgung wie z. B. einem Netzteil oder einer Batterie. **Achten Sie dabei unbedingt auf die korrekte Polung!**

Eine komfortable Lösung bietet auch das ELV Powermodul [PM-SB1](#), das mit zwei Batterien ausgestattet ist und somit autark arbeitet oder die in diesem Journal vorgestellte Variante [EXSB-Midi](#). 

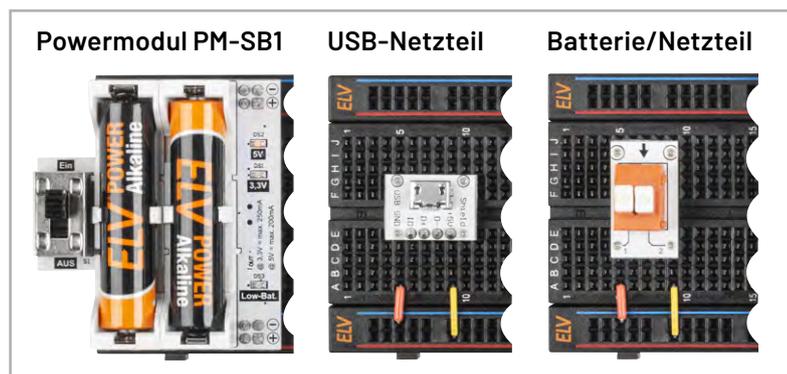


Bild 14: Unterschiedliche Varianten der Spannungsversorgung: mittels Powermodul PM-SB1, per 5-V-USB-Steckernetzteil oder einer Klemmleiste zum Anschluss an ein Labornetzteil oder eine Batterie

Alle bisher erschienenen Teile dieser Artikelserie zum PAD-PRO-Experimentierset finden Sie im ELVshop:

ELVjournal 3/2023	Teil 1: Professionell experimentieren – Prototypenadapter-Professional-Experimentierset PAD-PRO-EXSB	Artikel-Nr. 253473
ELVjournal 5/2023	Teil 2: Audioverstärker mit MEMS-Mikrofon – Anwendungsschaltung mit dem Prototypenadapter	Artikel-Nr. 253711
ELVjournal 6/2023	Teil 3: NE555-Grundsaltungen – Anwendungsschaltungen mit dem Prototypenadapter	Artikel-Nr. 253836
ELVjournal 1/2024	Teil 4: Anwendungsschaltungen mit dem Prototypenadapter-Professional-Experimentierset PAD-PRO-EXSB	Artikel-Nr. 253948
ELVjournal 2/2024	Teil 5: LEDs richtig ansteuern – Anwendungsschaltungen mit dem PAD-PRO-EXSB	Artikel-Nr. 254100
ELVjournal 3/2024	Teil 6: Alarmanlage mit Vibrationssensor – Anwendungsschaltungen mit dem PAD-PRO-EXSB	Artikel-Nr. 254146
ELVjournal 5/2024	Teil 7: Komparatorschaltungen mit Operationsverstärkern – Anwendungsschaltungen mit dem PAD-PRO-EXSB	Artikel-Nr. 254212
ELVjournal 6/2024	Teil 8: Aufbau einer Kojak-Sirene mit dem PAD-PRO-EXSB	Artikel-Nr. 254265
ELVjournal 1/2025	Teil 9: Experimente mit der Fotodiode BPW34 – Anwendungsschaltungen mit dem PAD-PRO-EXSB	Artikel-Nr. 254411

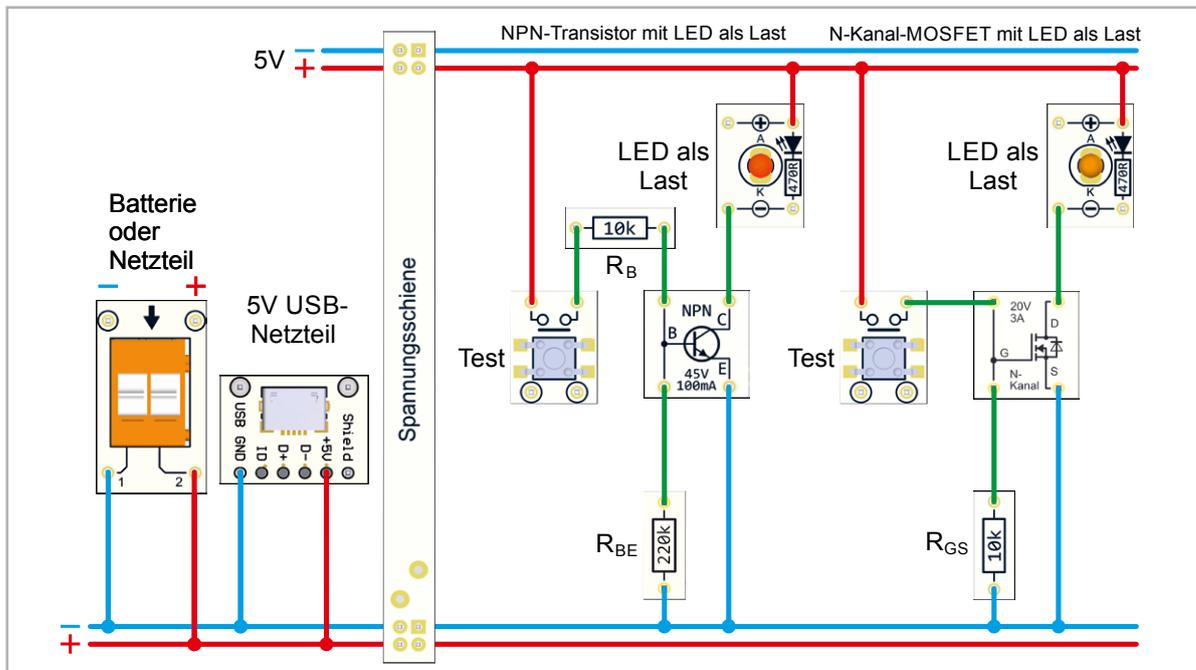


Bild 15: Anschlussplan für die Transistorgrundschaltungen

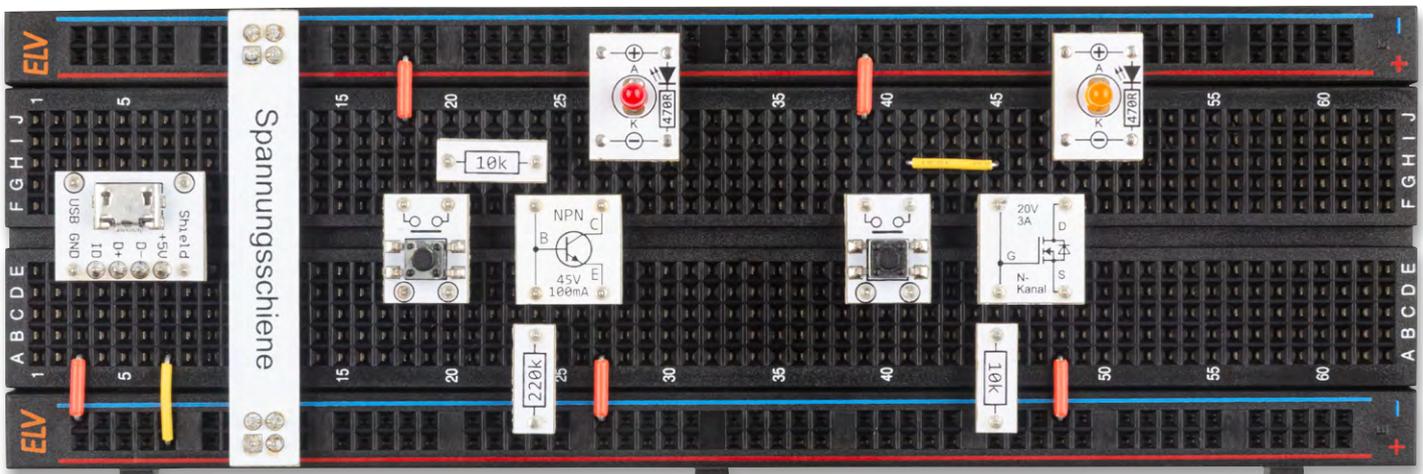


Bild 16: Aufbau der Transistorgrundschaltungen auf einem Steckboard

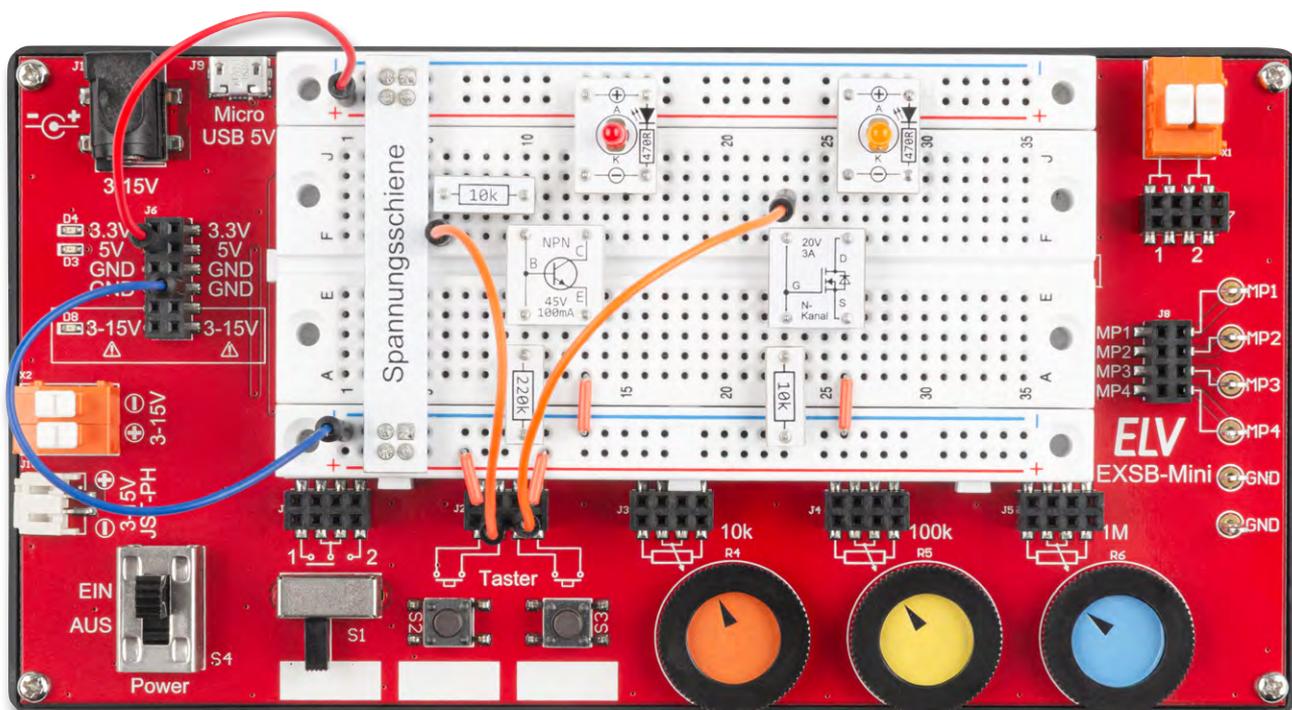


Bild 17: Aufbau der Transistorgrundschaltungen auf einem EXSB-Mini

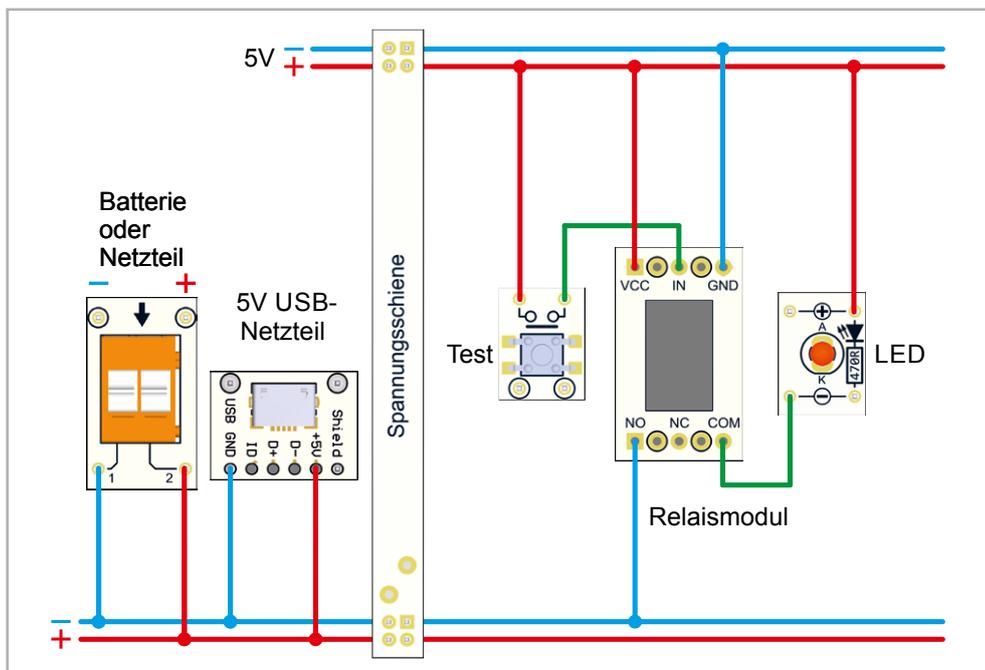


Bild 18: Anschlussplan für die Relais-Testschaltung

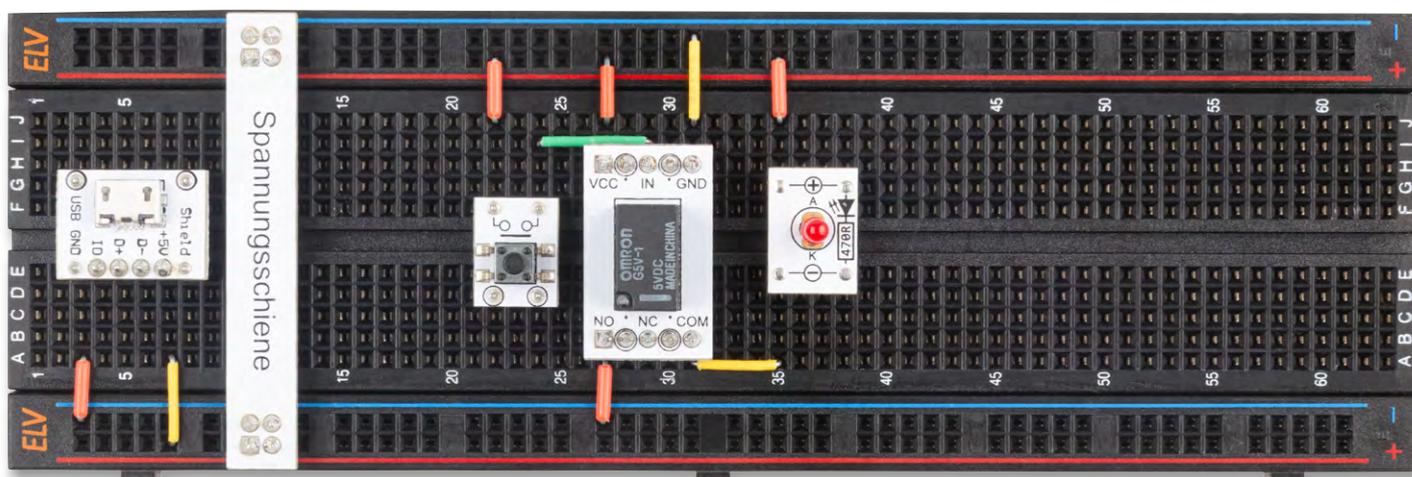


Bild 19: Aufbau der Relais-Testschaltung auf einem Steckboard

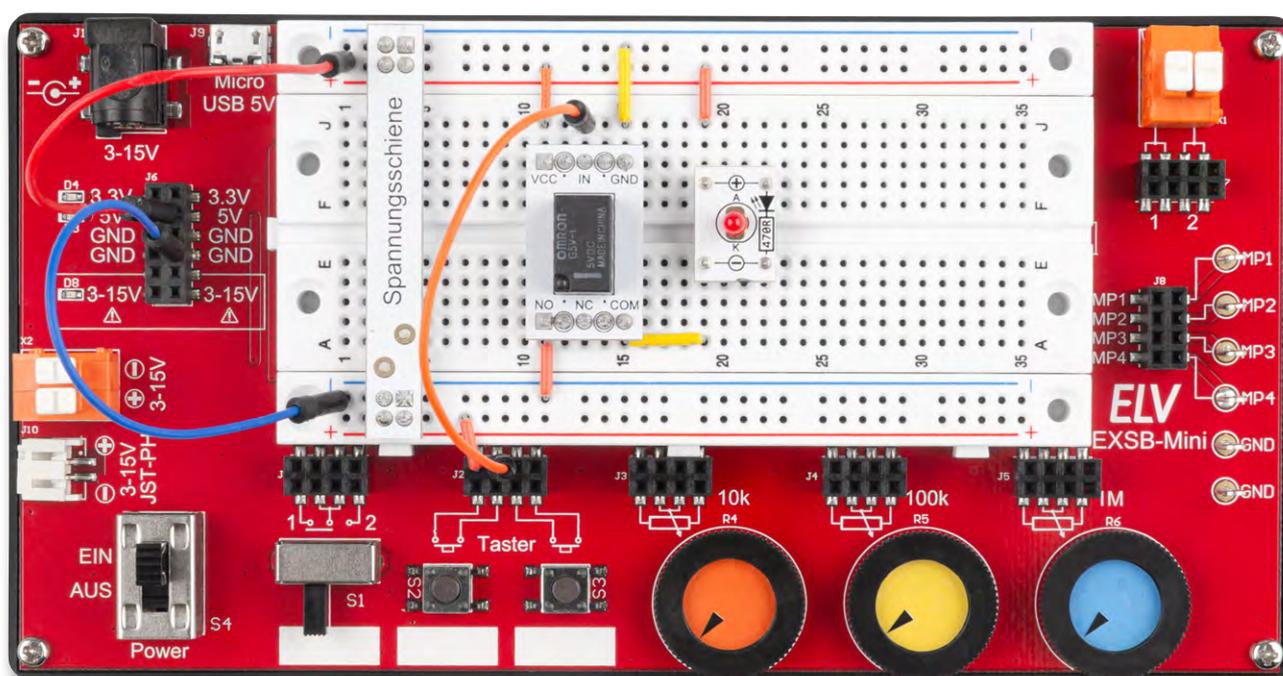


Bild 20: Aufbau der Relais-Testschaltung auf einem EXSB-Mini