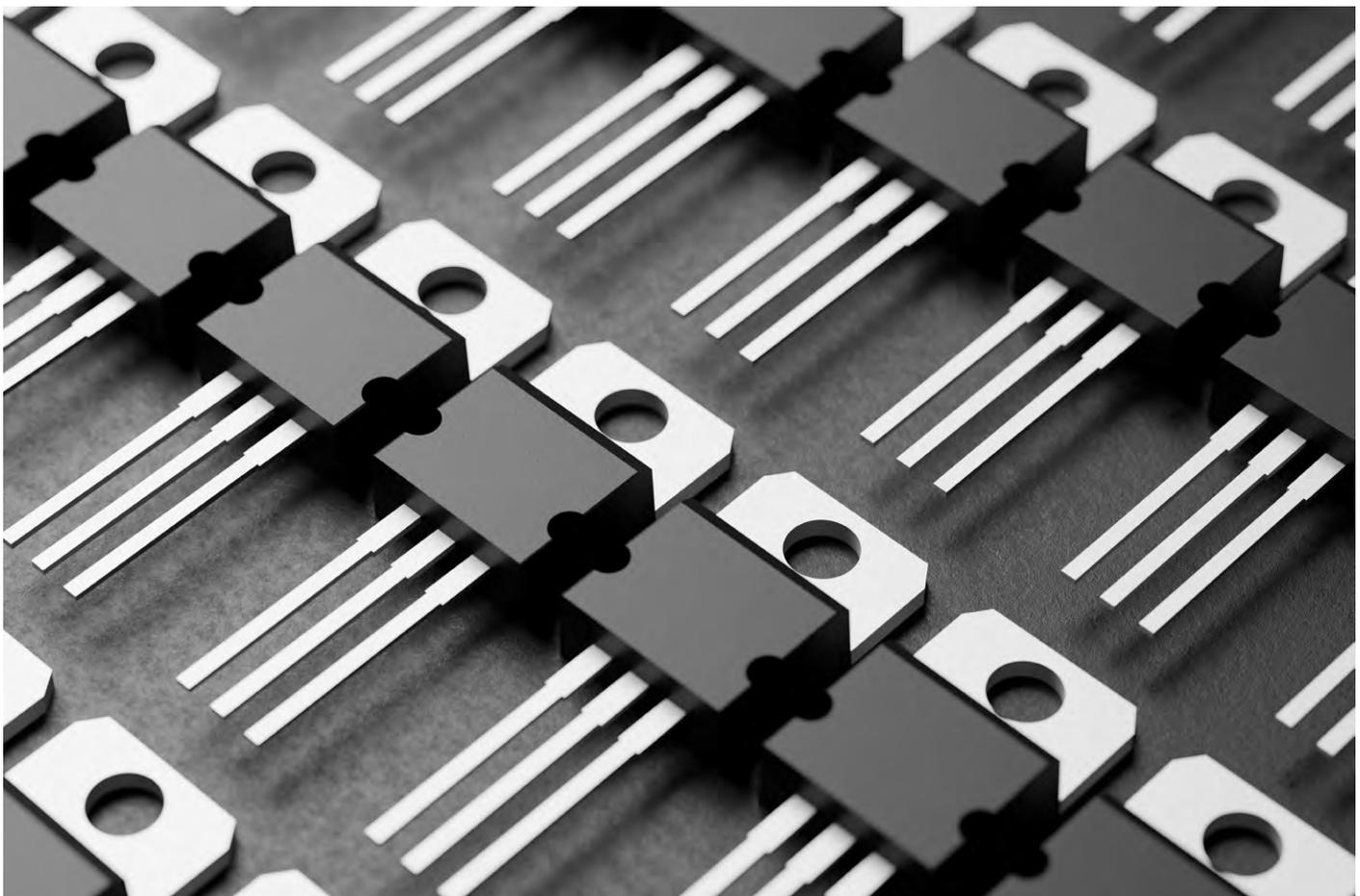


Halbleiterbauelemente mit vier Schichten: Thyristoren

Projekte für Elektronikeinsteiger

Teil 10

Thyristoren sind unverzichtbare Bauelemente in der Welt der Leistungselektronik. Sie zeichnen sich durch ihre Fähigkeit aus, hohe Ströme und Spannungen zu steuern, und finden Anwendung in einer Vielzahl von Technologien – von industriellen Motorsteuerungen über Wechselrichter bis hin zu Dimmern und Stromversorgungen. Als Halbleiterbauteile mit einem bistabilen Verhalten arbeiten Thyristoren wie elektronische Schalter, die durch ein kurzes Steuersignal geschaltet werden können. Ihre Robustheit, Effizienz und hohe Schaltgeschwindigkeit machen sie zu einer bevorzugten Wahl in Anwendungen, die Zuverlässigkeit und Präzision erfordern. Dieser Artikel beleuchtet die Funktionsweise und die Einsatzmöglichkeiten von Thyristoren. Dabei kann man sich die Tatsache zunutze machen, dass Thyristoren für einen ersten Einstieg auch durch eine spezielle Transistorschaltung ersetzt werden können.



Über den Autor

Dr. Günter Spanner ist als Autor zu den Themen Elektronik, Sensortechnik und Mikrocontroller einem weiten Fachpublikum bekannt. Schwerpunkt seiner hauptberuflichen Tätigkeit für verschiedene Großkonzerne wie Siemens und ABB ist die Projektleitung im Bereich Entwicklung und Technologie-Management. Der Dozent für Physik und Elektrotechnik hat zudem zahlreiche Fachartikel und Bücher veröffentlicht sowie Kurse und Lernpakete erstellt.

Halbleiter mit mehreren Schichten

Transistoren mit der Schichtenfolge NPN sind dem Leser dieser Artikelserie inzwischen bestens bekannt. Auch der sogenannte komplementäre Typ, mit der Schichtenfolge PNP wurde in mehreren Schaltungen bereits eingesetzt. Dabei ist zu beachten, dass bei ihm alle Spannungen in umgekehrter Polarität angeschlossen werden müssen (Emitter an Plus, Kollektor an Minus). Der PNP-Transistor wird leitend, wenn der Anschluss der Basis über einen Vorwiderstand an Minus gelegt wird.

Es gibt jedoch auch Halbleiterbauelemente mit vier Schichten in der Schichtenfolge PNPN. Sie sind mit zwei Anschlüssen ausgestattet: einem Anschluss an der äußeren P-Schicht (Anode) und einem Anschluss an der äußeren N-Schicht (Kathode). Man nennt sie Vier-Schicht-Dioden. Diese Bauelemente sperren zunächst. Wenn jedoch die Spannung zwischen Anode und Kathode kontinuierlich erhöht wird, erreicht man eine sogenannte Zündspannung, bei der das Bauelement leitend wird. Vier-Schicht-Dioden werden auch als [Shockley-Diode](#) bezeichnet (nicht zu verwechseln mit Schottky-Dioden). Sie werden gelegentlich für Überspannungs-Schutzanwendungen genutzt, allerdings ist ihr Einsatz relativ selten geworden. Mit einem weiteren Anschluss entsteht ein sogenannter Thyristor. Dieser Halbleitertyp hat im Gegensatz zur Vier-Schicht-Diode weite Verbreitung gefunden und soll deshalb im Folgenden näher betrachtet werden.

Erforderliches Material:

1x Transistor NPN (z. B. BC847C)

1x Transistor PNP (z. B. BC857C)

1x LED, rot

1x Taster

evtl. 1x TRIAC (z. B. TBT16) und

Glühlämpchen 9 V/300 mA o. Ä.

(siehe auch Abschnitt „Material“ am Ende des Artikels)

Die zündende Idee

Schließt man an der P-Schicht, die der Kathode benachbart ist, einen dritten Anschluss, das sogenannte Gate an, so wird aus der Vier-Schicht-Diode ein klassischer Thyristor (siehe Bild 1). Über das Gate kann die Vier-Schicht-Anordnung auch unterhalb der Zündspannung zu einem beliebigen Zeitpunkt gezündet werden. Nach erfolgter Zündung kann der Thyristor jedoch nicht mehr einfach abgeschaltet werden, da das Gate seine Wirkung verliert, sobald der Anodenstrom fließt. Es genügt also ein kurzer Zündimpuls am Gate, um den Leitungsmechanismus in Gang zu setzen. Der Anodenstrom dagegen erlischt erst, wenn er durch eine äußere Spannung so weit reduziert wird, dass sie unter die sogenannten Haltespannung sinkt. Erst dann sperrt der Thyristor wieder und ist bereit für eine erneute Zündung über das Gate.

Thyristoren als Schaltelemente

Ein Thyristor ist also ein Halbleiterbauelement, das als Schalter in elektrischen Schaltungen verwendet

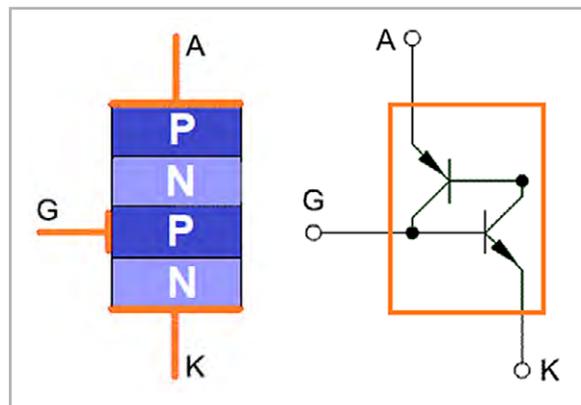


Bild 1: Ersatzschaltung für einen Thyristor

werden kann. Es besteht immer aus vier Halbleiterschichten, die abwechselnd p- und n-dotiert sind, wodurch es eine Struktur mit drei PN-Übergängen (PNPN) bildet.

Thyristoren haben zwei Hauptzustände:

1. Aus-Zustand (Sperrzustand):

In diesem Zustand blockiert der Thyristor den Stromfluss zwischen Anode und Kathode, ähnlich wie eine Diode, die in Sperrrichtung geschaltet ist.

2. Ein-Zustand (leitend):

Wenn ein positiver Impuls an das Gate (eine dritte Elektrode) angelegt wird, wechselt der Thyristor in den leitenden Zustand, bei dem er Strom in eine Richtung von der Anode zur Kathode durchlässt. Einmal eingeschaltet, bleibt der Thyristor leitend, bis der Stromfluss unterbrochen wird (z. B. durch einen externen Stromunterbrecher oder einen zu geringen Strom).

Thyristoren werden häufig in Anwendungen eingesetzt, bei denen eine hohe Schaltleistung erforderlich ist wie z. B. in Gleichstrommotorsteuerungen, Wechselrichtern, Phasenschnittsteuerungen und anderen Leistungselektronikgeräten. Sie sind besonders nützlich in Situationen, in denen eine hohe Effizienz und Zuverlässigkeit beim Schalten hoher Ströme und Spannungen erforderlich ist.

Zünden und Löschen: Aus zwei komplementären Transistoren entsteht ein Thyristor

Prinzipiell sind Thyristoren Schaltelemente mit drei Anschlüssen, ähnlich wie Transistoren. Interessanterweise kann man das Verhalten eines Thyristors mit einer Kombination aus NPN- und PNP-Transistoren nachstellen. Der Kollektorstrom des einen Transistors fungiert als Basisstrom des anderen Transistors, wodurch beide entweder gleichzeitig gesperrt oder leitend sind. Eine solche Schaltung, welche die Funktion eines Systems oder eines speziellen Bauelements nachbildet, wird auch als „Emulator“ bezeichnet.

Bild 2 zeigt eine Schaltung, bei der ein Thyristor durch zwei Transistoren ersetzt wurde. Die Schaltung kann leicht auf zwei kleineren Breadboards aufgebaut werden (Bild 3).

Nach dem Einschalten befindet sich die Schaltung zunächst im Sperrzustand. Eine kurze Schalterbetätigung am Gate versetzt sie in den leitenden Zustand. Erst durch das Abschalten der Betriebsspannung kehren die Transistoren wieder in den gesperrten Zustand zurück.

Theoretisch könnte die Schaltung auch ohne Basis-Emitter-Widerstand (1k Ω) arbeiten. Allerdings könnten dann selbst kleinste Spannungseinstreuungen dazu führen, dass sie ohne Schaltsignal zündet.

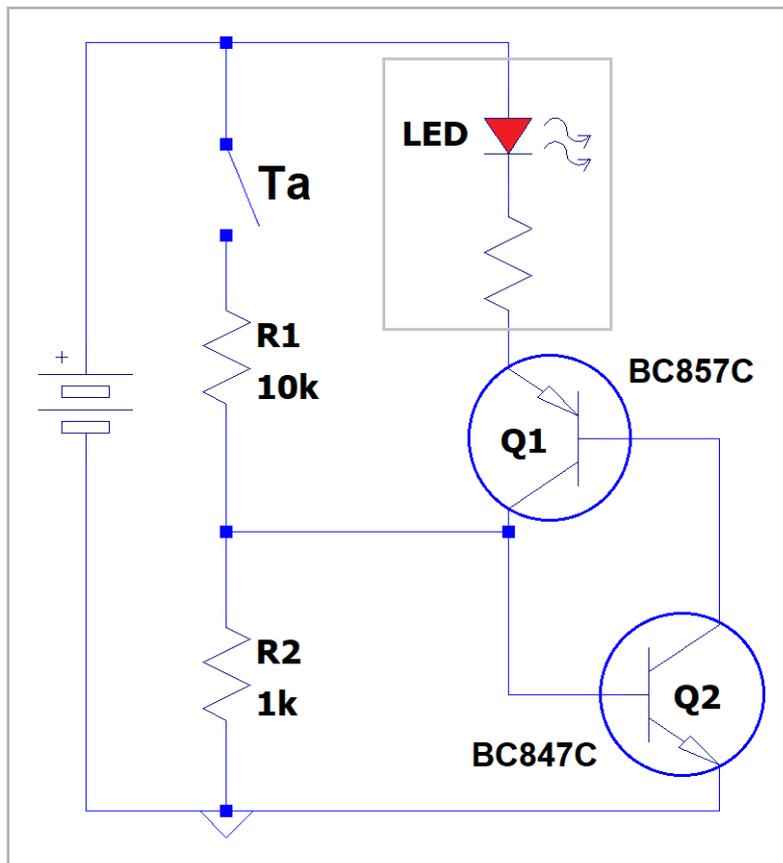


Bild 2: Zwei Transistoren bilden einen Thyristor.

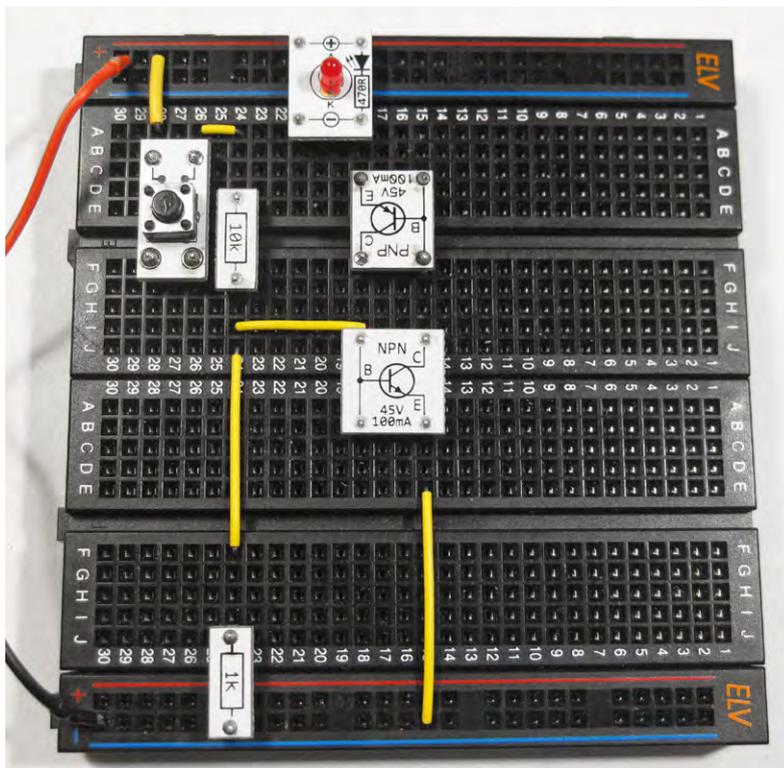


Bild 3: Aufbau zum Thyristor-Emulator

Zudem bewirken die geringen Sperrschichtkapazitäten der Transistoren beim Einschalten einen kleinen Ladestrom. Da die Verstärkung der Schaltung, ähnlich wie bei einem Darlington-Transistor, sehr hoch ist, kann schon ein schwacher Impuls ausreichen, um die Schaltung zu zünden. Ein zu großer Basis-Emitter-Widerstand verhindert dabei nicht immer zuverlässig ein selbstständiges Einschalten beim Anlegen der Betriebsspannung. Bei einem Wert von 1k Ω wird ein unbeabsichtigtes Zünden jedoch recht sicher verhindert. Ein Kondensator von 100 nF, der parallel zu R2 geschaltet wird, verbessert die Sicherheit gegen ungewolltes Zünden nochmals.

Zum Löschen der Schaltung muss die Stromzufuhr unterbrochen werden. Damit eignet sich der Aufbau z. B. auch als Alarmmelder. Ist der Alarm erst einmal ausgelöst, kann er nur durch Unterbrechen der Betriebsspannung wieder zurückgesetzt werden.

Ein Thyristor-Blitzer

Mithilfe eines Thyristors bzw. der entsprechenden Transistor-Ersatzschaltung lässt sich eine sehr einfache Blitzschaltung aufbauen (siehe Bild 4 und Bild 5). Wird die Schaltung mit Strom versorgt, ist der Kondensator zunächst entladen, das heißt, der Thyristor befindet sich im ausgeschalteten Zustand. Über den Widerstand R1 lädt sich nun der Kondensator C1 langsam auf, wodurch die Spannung am Gate des Transistors (Emitter von Q1) ansteigt. Schließlich wird die Schwellspannung erreicht, und der Transistor schaltet durch. Dadurch wird zum einen die LED eingeschaltet, und zum anderen entlädt sich der Kondensator über den Gate-Anschluss des Thyristors. Zudem sinkt die Spannung über dem Thyristor dadurch wieder unter die Schwellspannung, womit dieser sperrt und die LED erlischt.

Der Aufbau und die Arbeitsweise dieser Schaltung haben einen etwas experimentellen Charakter, da das Abschalten vom Spannungsabfall über der LED abhängt. Man sollte daher vor der Inbetriebnahme genau prüfen ob alle Bauelemente korrekt eingesteckt sind. Da die LED ohne Vorwiderstand betrieben werden muss, kann sie Schaden nehmen, wenn z. B. der 100-Mikrofarad-Kondensator in der Schaltung vergessen wurde. Will man dieses Risiko vermeiden, sollte man die Schaltung nicht in Betrieb nehmen. Andererseits ist die Schaltung ein schönes Beispiel dafür, wie man auch mit sehr einfachen Mitteln einen LED-Blitzer aufbauen kann. Sie kommt daher in vielen Praxisanwendungen zum Einsatz.

Bild 5 zeigt einen Aufbauvorschlag für den Thyristor-Blitzer. Hierbei ist besonders die Einbaulage des Transistors T1 zu beachten. Um einen kompakten Aufbau zu realisieren, muss dieser um 180 Grad gedreht eingebaut werden.

Die Schaltung kann zum Beispiel als Simulator einer Alarmanlage verwendet werden. Wenn man sie in einem Fahrzeug versteckt einbaut und nur die blinkende LED sichtbar bleibt, kann man sie praktisch nicht von einer scharf geschalteten Alarmanlage unterscheiden. Zumindest Gelegenheitsdiebe lassen sich so eventuell von einem Einbruch abhalten.

Nadelimpulse

Im Gegensatz zum klassischen Multivibrator erzeugt der Thyristor-Blinker kein Rechtecksignal, sondern scharfe Nadelimpulse an der Kathode der LED (siehe Bild 6 und Bild 7). Die Impulse erscheinen hier nach unten gerichtet, da die LED aufblitzt, sobald sie vom Thyristor auf Masse durchgeschaltet wird.

Scharfe Nadelimpulse haben in der Elektronik eine Vielzahl von Anwendungen, da sie sehr kurze und präzise Spannungsspitzen erzeugen. In der Messtechnik werden sie beispielsweise verwendet, um die Laufzeiten von Signalen in Kabeln oder elektronischen Schaltungen zu messen. Eine bekannte Methode ist die **Time-Domain-Reflektometrie (TDR)**, bei der die Reflexion der Impulse genutzt wird, um die Länge eines Kabels genau zu bestimmen oder mögliche Defekte zu orten. Auch in der Oszilloskop-technik spielen sie eine wichtige Rolle, da Nadelimpulse als Trigger-Signale verwendet werden, um Messungen präzise zu synchronisieren und eine stabile Anzeige zu gewährleisten.

Darüber hinaus finden Nadelimpulse in Puls-Generatoren Anwendung, die in Forschungslaboren oder industriellen Anwendungen genutzt werden, um elektronische Systeme zu testen. Im Bereich der Radartechnik werden sie eingesetzt, um über die Reflexion der extrem kurzen, aber leistungsstarken Impulse von Objekten genaue Informationen über Entfernung, Geschwindigkeit und Richtung zu erhalten. Aufgrund ihrer kurzen Dauer ermöglichen Nadelimpulse im Radar also eine präzise Ortung und Bildgebung. In der digitalen Elektronik dienen sie als Taktsignale, die für die Synchronisierung und Steuerung von Schaltvorgängen in Mikroprozessoren und anderen digitalen Schaltungen unerlässlich sind.

In der Hochfrequenztechnik können Nadelimpulse auch als Trägersignal verwendet werden, da sie ein breites Frequenzspektrum abdecken und somit zur Erzeugung von Breitbandsignalen nützlich sind. Ebenso werden sie in Testumgebungen von Elektronikbauteilen eingesetzt, um die Reaktionszeit von Komponenten wie Dioden oder Transistoren unter extrem kurzen, intensiven Belastungen zu messen. Schließlich finden Nadelimpulse oftmals auch in der Lasertechnik Anwendung, wo sie zur präzisen Ansteuerung von Kurzpuls-Lasern genutzt werden.

Für angehende Profis: „echte“ Thyristoren und TRIACs

In der Praxis werden Thyristoren meist nicht durch zwei Transistoren emuliert. Vielmehr stehen eigenständige Bauteile zur Verfügung, die für die entsprechenden Anwendungszwecke optimiert sind. Ein klassischer Typ ist der **MCR12**. Diese Variante kann Spannungen bis zu 400 V und Ströme von bis zu 12 A schalten.

Wichtiger Hinweis:

Es dürfen nur ausgebildete Fachleute solche Spannungen und Ströme handhaben!

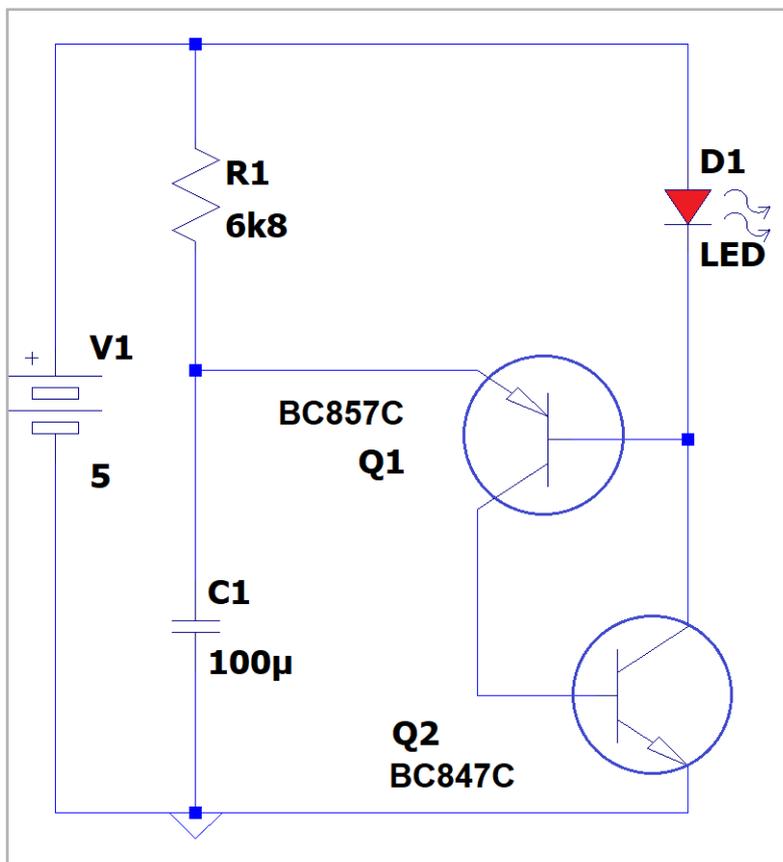


Bild 4: Blitzschaltung mit Thyristor

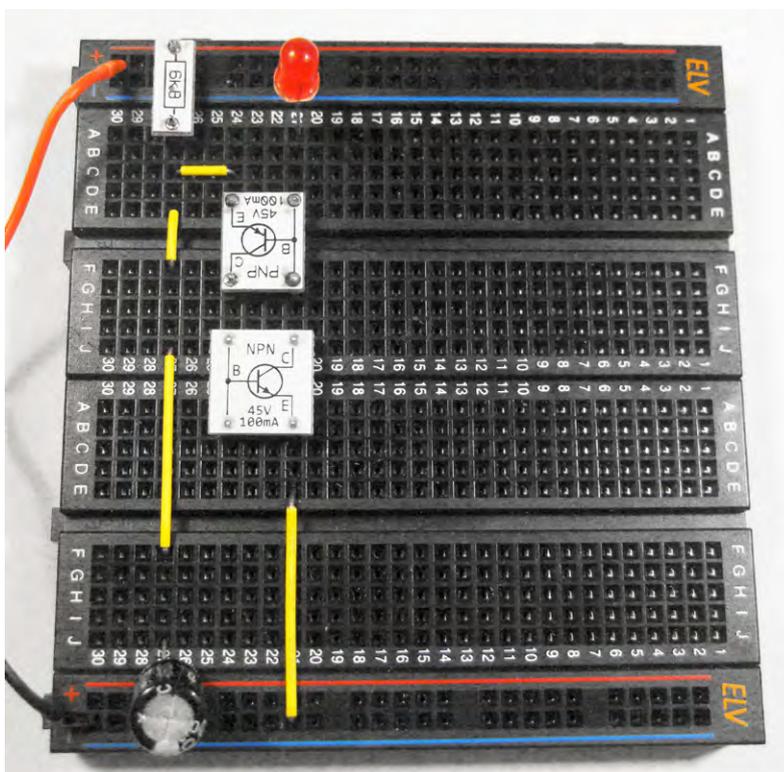


Bild 5: Aufbauvorschlag zum Thyristor-Blitzer

Ein TRIAC ist eine Erweiterung des Thyristors und kann Strom in beide Richtungen (positive und negative Halbwelle) leiten. Er wird oft in Wechselstromanwendungen verwendet. Der TRIAC hat ebenfalls drei Anschlüsse: Anode 1 (A1), Anode 2 (A2) und Gate (Bild 8).

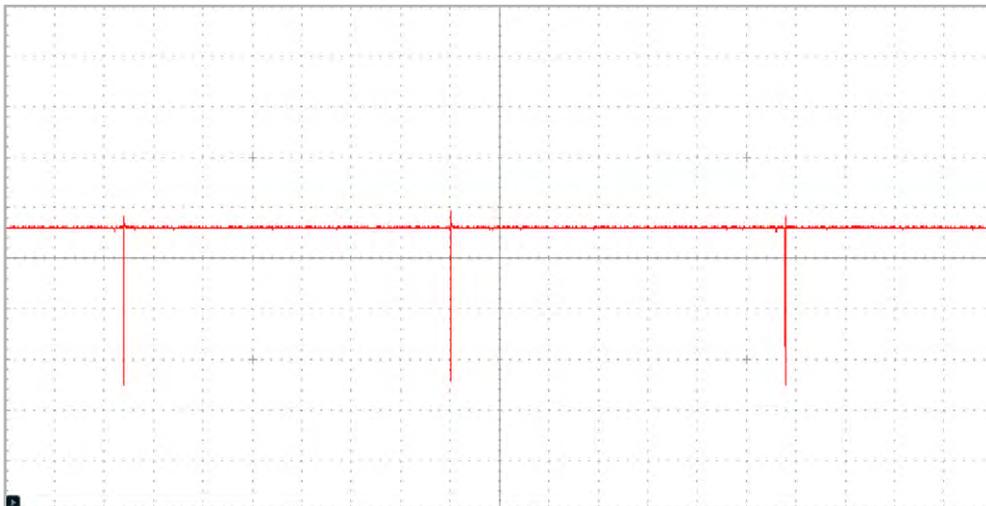


Bild 6: Scharfe Nadelimpulse des Thyristor-Blinkers (1 V bzw. 100 ms/Skalenteil)

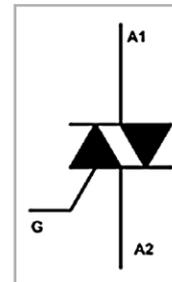


Bild 8: Schaltzeichen TRIACs

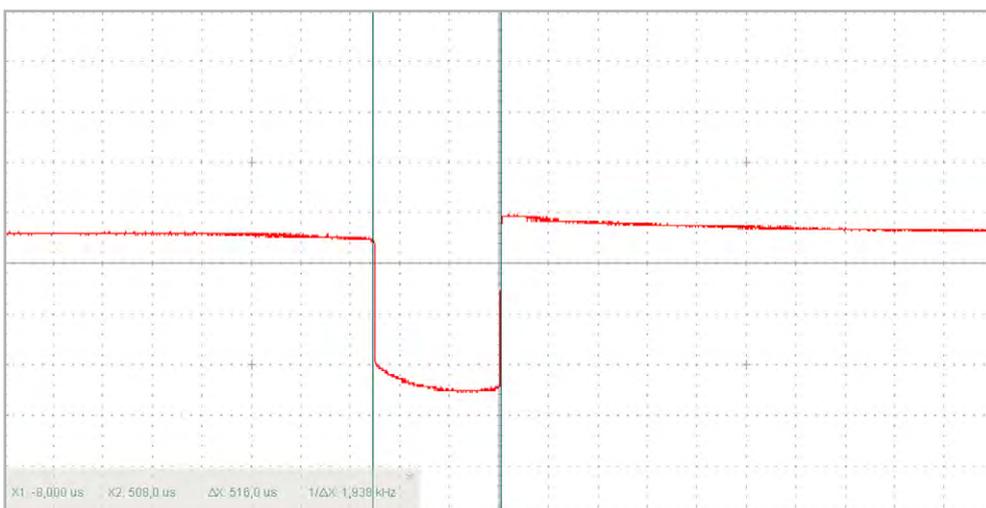


Bild 7: Die Pulslänge beträgt lediglich eine halbe Millisekunde (1 V bzw. 0,2 ms/Skalenteil)

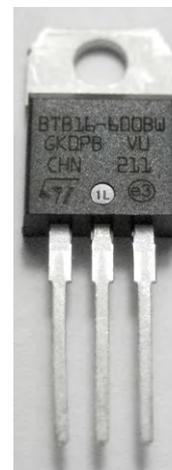


Bild 9: TRIAC (BTB16)

Ähnlich wie ein Thyristor kann der der TRIAC durch eine kleine Spannung am Gate in beide Richtungen leitend gemacht werden und bleibt leitend, bis der Strom unter einen bestimmten Wert fällt. Im Gegensatz zu einem Thyristor, der nur in einer Richtung leitet, kann der TRIAC positive und negative Halbwellen in einem Wechselstromkreis steuern. TRIACs werden häufig in Dimmern, Wechselstromschaltern und anderen Anwendungen eingesetzt, bei denen sowohl die positive als auch die negative Halbwelle des Wechselstroms gesteuert werden soll (z. B. Haushaltsgeräte, Lampendimmer). Thyristoren werden deshalb vorwiegend in Gleichstromanwendungen oder Steuerungen von großen Lasten eingesetzt. TRIACs dagegen finden sich häufig in Wechselstromanwendungen.

Die häufigsten Einsatzgebiete für beide Varianten sind:

1. Leistungssteuerung, für elektrische Lasten wie Motoren, Heizungen und Beleuchtungssysteme;
2. Gleichrichterschaltungen, wie z. B. für die Umwandlung von Wechselstrom (AC) in Gleichstrom (DC). Sie ermöglichen es hier, hohe Ausgangsspannung zu steuern und hohe Ströme zu schalten;

3. Wechselrichter, die Gleichstrom in Wechselstrom umwandeln, z. B. in unterbrechungsfreien Stromversorgungen (USV) oder bei Solarstromanlagen;
4. Phasenanschnittsteuerungen nutzen Thyristoren oder TRIACs, um den Einschaltzeitpunkt innerhalb eines Wechselstromzyklus zu verschieben. Dadurch lässt sich die Leistung, die an eine Last abgegeben wird, präzise steuern. Typische Anwendungen sind Dimmer für Beleuchtungen und Regelungen von Motoren;
5. Schutzschaltungen, wie Überspannungsschutzgeräte verwenden TRIACs, um empfindliche Elektronik vor Spannungsspitzen zu schützen;
6. Stromrichter für Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungen nutzen Thyristoren, um den Stromfluss in den Stromrichtern zu steuern. Diese Technologie wird häufig eingesetzt, um elektrische Energie über große Entfernungen zu übertragen.

Falls ein Thyristor (z. B. MCR12) oder ein TRIAC (z. B. [BTB16](#), siehe [Bild 9](#)) zur Verfügung steht, kann dieser anstelle der Transistoren in die Schaltung nach [Bild 3](#) eingesetzt werden (siehe [Bild 10](#)).

Dazu sind folgende Änderungen notwendig (siehe Bild 10):

- Die beiden Transistoren müssen durch den Thyristor ersetzt werden.
- Die LED muss durch ein Glühlämpchen ersetzt werden, da der Haltestrom eines Thyristors bei etwa 50 Milliampere liegt und der Strom durch die LED deutlich kleiner wäre.
- Ein Glühlämpchen demonstriert zudem die hohe Schaltleistung des Thyristors (9 V/300 mA, also 2,7 W) im Gegensatz zu wenigen Milliwatt bei einer LED.
- Der Gate-Widerstand muss reduziert werden (ca. 330 Ω), da ein leistungsstarker Thyristor einen höheren Strom benötigt als die Emulation mit den beiden Einzeltransistoren.

Mit diesen Änderungen verhält sich die Schaltung dann exakt wie das Gegenstück mit dem emulierten Thyristor. Durch kurzes Betätigen des Tasters wird die Lampe eingeschaltet, das Ausschalten erfolgt durch Unterbrechung der Stromversorgung. Bild 11 zeigt einen Aufbauvorschlag dazu.

Ergänzungen und Anregungen

- Schalten Sie einen 100-nF-Kondensator parallel zu R2 in der Schaltung nach Bild 2 bzw. Bild 3. Schalten Sie die Batteriespannung mehrmals ein und aus. Es kommt nun so gut wie nicht mehr vor, dass der Thyristor ohne einen positiven Impuls am Gate von selbst zündet. Das liegt daran, dass ein schlagartiger Anstieg der Anodenspannung und damit ein Zündvorgang vermieden wird. Der Kondensator bewirkt in der Schaltung einen gebremsten Spannungsanstieg.
- Mit einer kleinen Erweiterung kann die Schaltung auch als Flipflop genutzt werden.
- Wo könnte man einen zweiten Schalter anbringen, der zum „Rücksetzen“ dient?
- Wie könnte man die Blitzfrequenz des Thyristor-Blitzers verändern?
- **WICHTIG:** Man sollte die Schaltung vor jedem Umbau von der Spannungsversorgung trennen, um eine Beschädigung der Bauelemente zu vermeiden!

Ausblick

Nachdem in diesem Artikel die Grundlagen und Anwendungen von Halbleitern mit mehreren Schichten, insbesondere Thyristoren und TRIACs, genauer betrachtet wurden, soll es im nächsten Beitrag um Sensoren gehen. Dabei werden vor allem optische Sensoren betrachtet. Zum Einsatz kommen insbesondere Halbleiter-Photodioden, die die Umgebungslichterfassung erfassen.

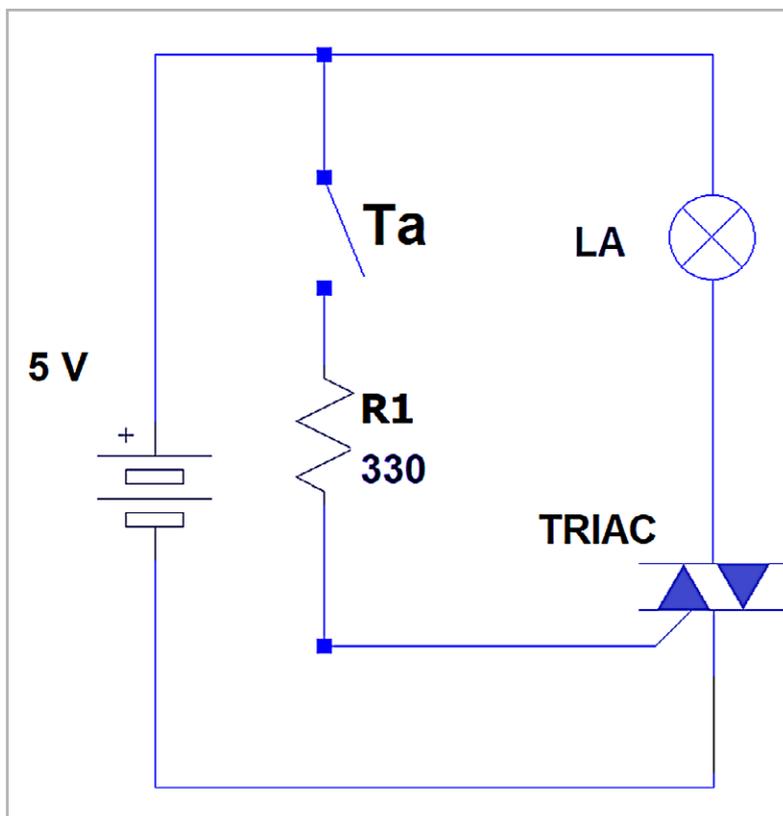


Bild 10: Schaltung mit einem „echten“ TRIAC

Zudem können mit diesen Komponenten interessante Anwendungen wie Lichtschranken aufgebaut werden. In der Praxis werden diese sogenannten Optosensoren häufig auch mit TRIACs kombiniert, um etwa automatische Haus- oder Straßenbeleuchtungen zu steuern. **ELV**

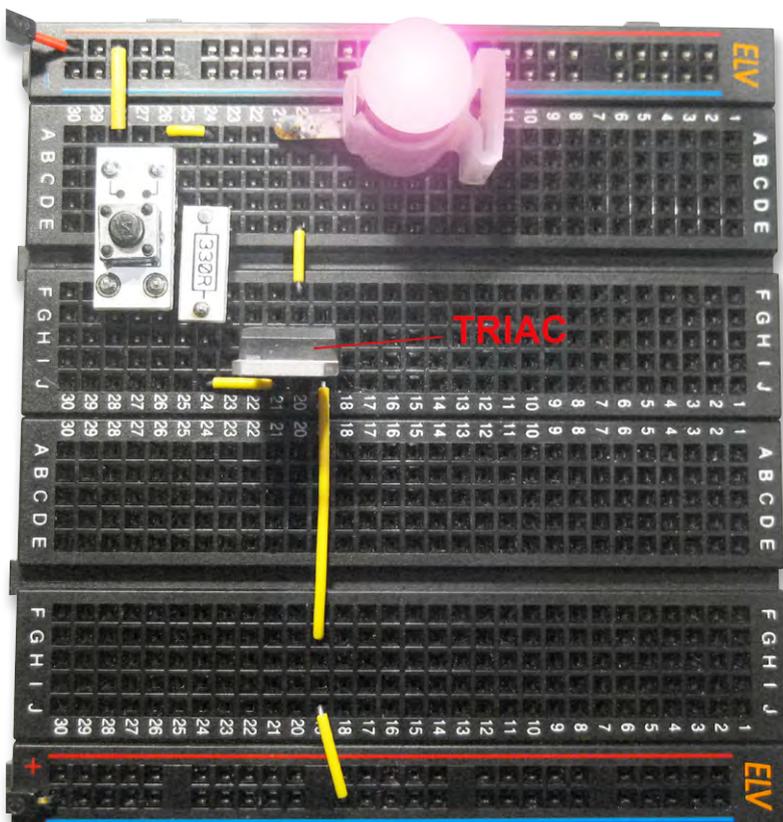


Bild 11: Aufbau mit TRIAC (BTB16)

Material

2x Breadboard
PAD-PRO-EXSB

Artikel-Nr. [251467](#)
Artikel-Nr. [158980](#)