

BASISWISSEN FLIPPER-ELEKTRONIK

Ein Service von www.flippermarkt.de

Kapitel 3

Version 1.0 – 23.1.2007

Version 1.01 – 6.2.2007

Version 1.1 – 18.6.2008, Nachtrag FETs auf Seite 9

Version 1.2 – 11.9.2008, Nachtrag Thyristoren (SCRs) auf Seite 10

Schalter – Teil 1

Transistoren und andere Output-Schalter

Mit welchen Schaltern der Prozessor Spulen, Flasher und Lampen steuert und wie diese Schalter funktionieren.

© Jan Schaffer (buja85)

Der Inhalt dieses Dokuments ist urheberrechtlich geschützt. Seine Nutzung ist nur zum privaten Zweck zulässig. Jede Vervielfältigung, Vorführung, Sendung, Vermietung und/oder Leihe des Dokuments oder einzelner Inhalte ist ohne Einwilligung des Rechteinhabers untersagt und zieht straf- oder zivilrechtliche Folgen nach sich. Alle Rechte bleiben vorbehalten.

In der Flipperelektronik werkeln Hunderttausende von Schaltern.
Alle haben die Funktion, im eingeschalteten Zustand einen Stromkreis zu schließen, im ausgeschalteten Zustand diesen zu unterbrechen.
Die weit überwiegende Anzahl der Schalter sind Transistoren, die im leitenden Zustand eingeschaltet, im nicht leitenden Zustand ausgeschaltet sind.

Nur wenige dieser Transistoren finden wir als Einzelstücke, dabei handelt es sich um **Diskrete Bauelemente**.

Die meisten sind integriert, also zusammen mit vielen anderen in einem Gehäuse untergebracht. Das nennt man dann eine **Integrierte Schaltung (IC)**.

Uns interessieren hier nur die Schalter, welche die Verbindung zur Außenwelt herstellen, und diese sind mit wenigen Ausnahmen (wie das berühmte IC U20) Einzelstücke.

Wir stellen uns einen Flipper als eine Black Box vor.

Die Ereignisse am Eingang führen, gesteuert durch den Prozessor, zu Ereignissen am Ausgang. Am Eingang erfassen Schalter mechanische Ereignisse, ob ein Flipperknopf betätigt wird, ein Ziel getroffen wurde, wo sich gerade eine Kugel befindet etc.

Diese Schalter nennen wir **Input-Schalter**.

Am Ausgang bewirken Schalter, dass Spulen, Lampen, Magnete, Motoren etc. ein- und ausgeschaltet werden.

Diese Schalter nennen wir **Output-Schalter**.

Alle übrigen Schalter betrachten wir als **Interne Schalter**.

In diesem Kapitel befassen wir uns nur mit **Output-Schaltern** und den ihnen vorgeschalteten Internen Schaltern, so weit dies zum Verständnis der Funktion der jeweiligen Output-Schalter sinnvoll ist.

Elektromechanische Schalter:

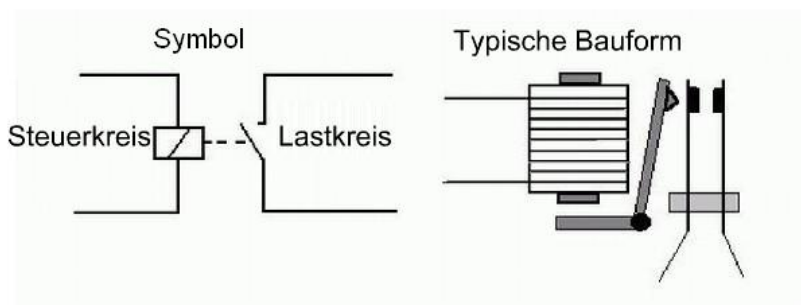
Diese kennen wir unter der Bezeichnung Relais.

Durch die Spule wird Strom geschickt, meist Gleichstrom. Durch das dadurch entstehende Magnetfeld wird der Anker angezogen, und über den Hebel werden die Kontakte betätigt, von denen mehrere vorhanden sein können.

Mit einem kleinen Strom für die Spule im Steuerkreis kann ein hoher Strom im Lastkreis bewirkt werden.

Mit Relais können komplette Steuerungen aufgebaut werden, wie es in den elektromechanischen Flippern der Fall ist. Im Laufe der Zeit wurden immer weniger Relais in Flippern verbaut, bis auf die ersten Exemplare der WPC-Generation findet man sie nur noch in Ausnahmefällen. Sie wurden durch Halbleiter ersetzt.

Sie haben den Vorteil der galvanischen Trennung, Steuerstrom und Laststrom können aus verschiedenen Quellen stammen, ein gemeinsames Potential ist nicht erforderlich.



Über einen Relaiskontakt kann Gleichstrom und Wechselstrom geschaltet werden.

Elektronische Schalter:

Neben **Transistoren** finden auch **Thyristoren (SCRs)** und **TRIACs** Verwendung.

Im Mittelpunkt unserer Betrachtungen stehen die **bipolaren Transistoren**, hinsichtlich FETs und Thyristoren wird auf die Nachträge auf Seite 9 und 10 verwiesen.

Ein Transistor ist von Geburt her ein analoges Bauelement, kein digitales, zu einem solchen muss er erst „getrimmt“ werden.

Ein Transistor verstärkt den Strom in seine / aus seiner Basis in der Weise, dass der Strom durch die Kollektor-Emitter-Strecke, verstärkt um einen Faktor zwischen 100 und 10.000, analog folgt.

Damit die Kollektor-Emitter-Strecke überhaupt beginnt, leitend zu werden, muss dort eine Mindestspannung anliegen, die sogenannte Durchlassspannung. Die Höhe hängt vom Typ des Transistors ab, im Mittel beträgt sie etwa 0,5 V. Im Gegensatz zu einem geschlossenen Relaiskontakt wird man über einem geschlossenen Transistorschalter immer eine Spannung in dieser Größenordnung messen.

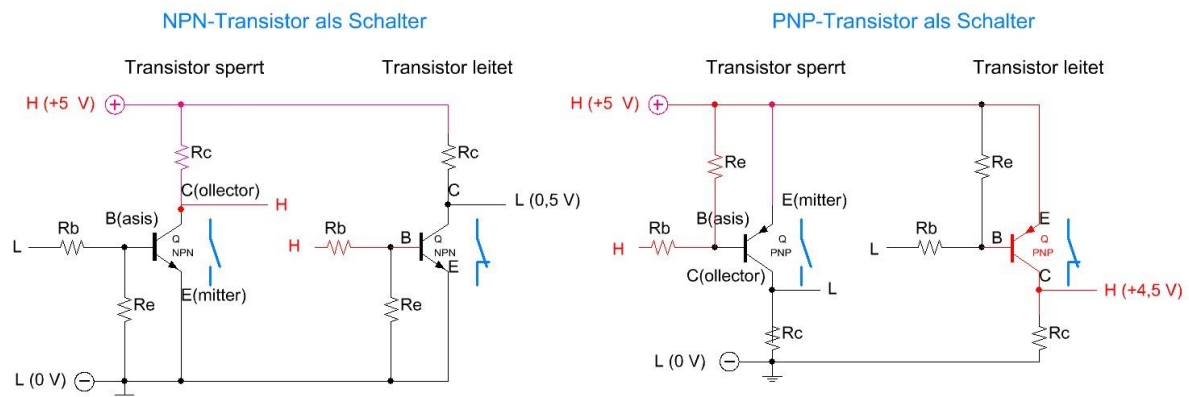
Erreicht der Basisstrom eine bestimmte Größe, wird der Transistor vollständig leitend, er ist dann gesättigt.

Zu einem Schalter wird er dadurch, dass ihm an der Basis so viel Strom zugeführt / entnommen wird, dass er gesättigt ist oder gar kein Strom ermöglicht wird. Der halbleitende Zustand muss vermieden werden.

Der „Schieber“ an der Basis muss entweder völlig geöffnet oder gänzlich geschlossen sein.

Wir unterscheiden zwischen **NPN- und PNP-Transistoren**. Im Stromlaufplan erkennt man den jeweiligen Typ daran, ob der Pfeil des Emitters nach außen oder innen zeigt.

Die folgende Abbildung zeigt sie in ihrer Funktion als Schalter.



Bei NPN Transistoren muss Strom in die Basis hinein und aus dem Emitter herausfließen, damit die Kollektor-Emitter-Strecke leitend wird.

Hat die Basis das gleiche Potential wie der Emitter, kann in die Basis kein Strom fließen, der Transistor ist gesperrt, er ist ausgeschaltet. Das Potential H gelangt über Rc auf den Kollektor.

Ist das Potential der Basis dagegen positiv gegenüber dem des Emitters, kann über Rb Strom in die Basis fließen, dadurch wird die Kollektor-Emitter-Strecke leitend, der Transistor ist eingeschaltet, das Potential L wird auf den Kollektor durchgeschaltet.

Die Widerstände sind für die grundsätzliche Betrachtung irrelevant. Rb begrenzt den Basisstrom, Re legt sicherheitshalber die Basis auf das Potential des Emitters, und Rc begrenzt den Kollektor- bzw. Emitterstrom.

Bei PNP Transistoren dagegen muss Strom in den Emitter hinein und aus der Basis herausfließen, damit die Emitter-Kollektor-Strecke leitend wird.

Transistoren sind gepolt, sie können nur Gleichstrom schalten.

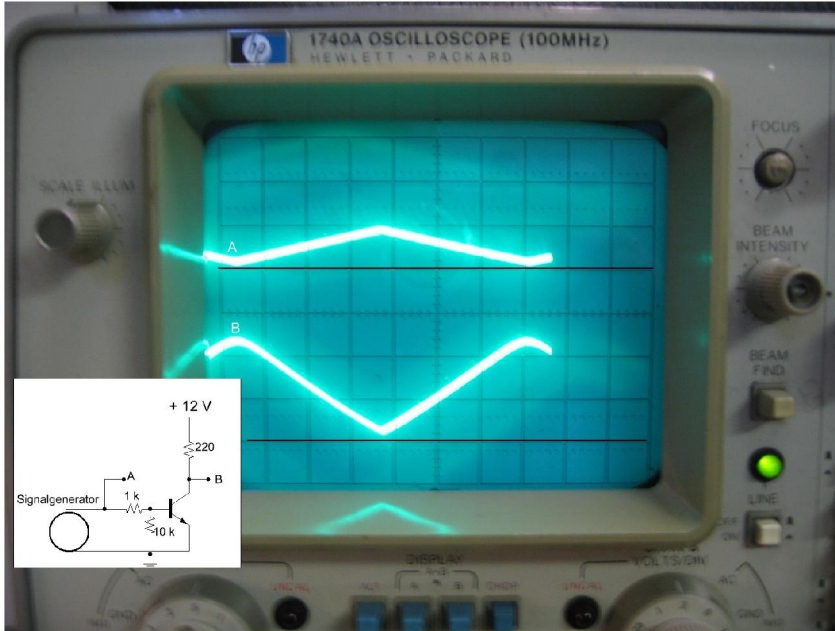
Ein **Transistor** (wie auch jeder andere elektronische Schalter) wird in den Stromlaufplänen mit **Q** gekennzeichnet (ein **IC** mit **U**).

Die Bauteile werden in den Stromlaufplänen nummeriert, und auf den Platinen befindet sich dann an ihrer dortigen Position eine identische Beschriftung.

Im folgenden Bild sehen wir die Signale an der Basis und dem Kollektor eines NPN-Transistors, der als **Verstärker** betrieben wird.

Mit ansteigender Spannung an A wird der Basis analog Strom zugeführt.

Nach Verlassen der Nulllinie beginnt der Transistor leitend zu werden, die Stromstärke folgt linear der Spannung. Ebenso linear folgt, invertiert, die Spannung am Kollektor (B). Je mehr Strom durch einen Transistor fließt, desto weniger Spannung fällt an ihm ab, bis seine Durchlassspannung erreicht ist.



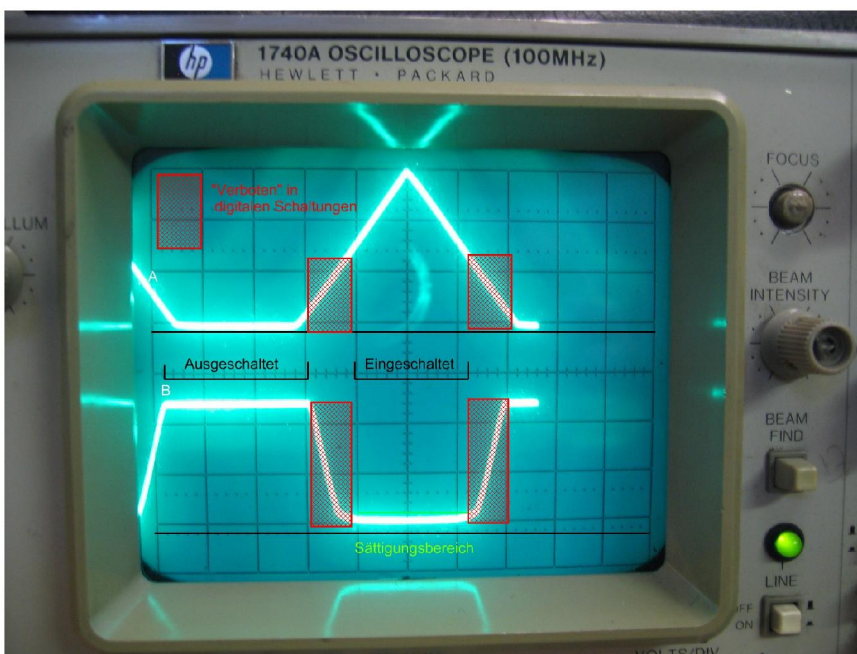
Hier nun wird der Transistor durch höheren Strom in die Basis zur Sättigung gebracht.

Man sieht deutlich, dass der Transistor ab einer bestimmten Höhe der Basisspannung voll leitend ist. Ebenso deutlich ist zu sehen, dass zwischen ausgeschaltet und eingeschaltet eine „verbotene“ Zeitstrecke liegt, während der der Transistor als Schalter nichts taugt.

Die Spannung an der Basis steigt und fällt nicht schnell genug, das Signal muss steiler sein.

Dies ist in der Praxis meist der Fall, wenn Transistoren mit Rechtecksignalen angesteuert werden.

Vom Signalgenerator wurde jedoch bewusst ein Sägezahn-Signal angelegt, um die verbotenen Bereiche sichtbar zu machen. Denn diese bereiten mitunter Ärger, da ungewiss ist, wie nachgeschaltete Bauelemente darauf reagieren.



Wir befassen uns nun mit den in WPC-Geräten verwendeten Schaltungen. Diese finden wir auch in älteren Flippern, wenn auch meistens in abgewandelter Form.

Die erste Abbildung zeigt die am häufigsten eingesetzte Ansteuerung von **Spulen**.

Als Schalter der Last fungiert Transistor Q2. Dies ist ein **Darlington-Transistor**, auch Emitterfolger genannt. Er ist in der Funktion identisch mit einem normalen Transistor, hat aber eine erheblich höhere Stromverstärkung.

Ist er leitend, fließt Strom durch die Spule gegen Masse..

Wir sehen, dass der Verbraucher direkt an die Versorgungsspannung angeschlossen ist, diese beträgt bei WPC-Geräten ohne Last ca. +70 V.

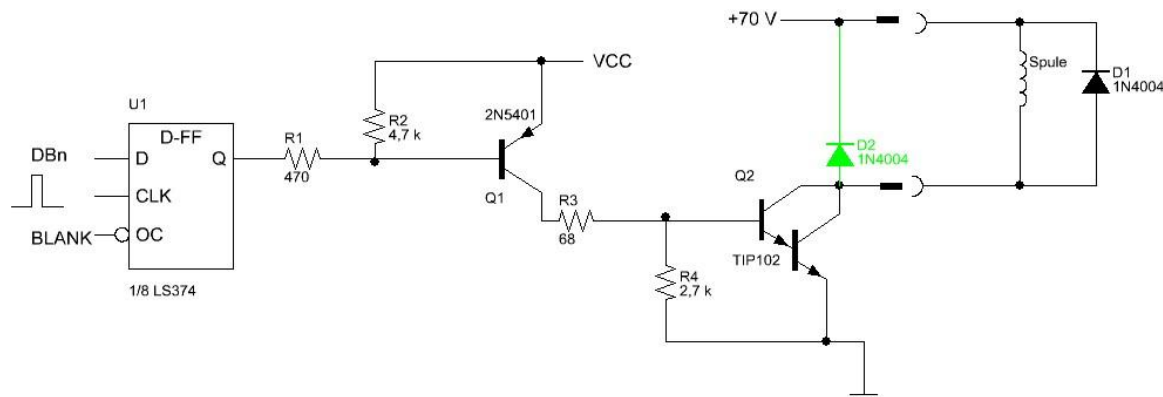
Flasher werden genau so betrieben, da ist lediglich die Versorgungsspannung geringer (ca. +23 V).

An jedem Verbraucher, der nicht eingeschaltet ist, muss also an beiden Anschlüssen diese Spannung gemessen werden können, wenn Sicherung, Stecker, Kabel und der Verbraucher selbst in Ordnung sind. Ist er eingeschaltet, liegt diese Spannung nur an seinem positiven Anschluss an.

Parallel zu der Spule sehen wir die Diode D1, eine Schutzdiode.

Beim Abschalten des Stroms durch Q2 bricht das in der Spule aufgebaute Magnetfeld zusammen und induziert in der Spule eine Spannung mit umgekehrter Polarität. Der Strom muss durch eine Schutzdiode kurzgeschlossen werden, sonst könnte der Transistor zerstört werden.

Zusätzlich befindet sich häufig auf der gleichen Platine wie der Transistor, bei WPC-Geräten auf dem PDB, die Diode D2. Wenn sie vorhanden ist, ist D1 an der Spule überflüssig, richtet aber keinen Schaden an.



Bei der Analyse der Schaltung beginnen wir mit U1, einem D-Flipflop, wie wir es aus dem Kapitel Schaltungsgebrauch kennen. Da wir uns in diesem Kapitel nicht mehr mit Logik befassen, sondern mit Physik, werden **H** und **L** statt 1 und 0 verwendet.

Der Prozessor setzt das für den Verbraucher vom Programm vorgesehene Datenbit auf L und erzeugt danach ein Clock-Signal, mit dessen ansteigender Flanke Potential L auf Q durchgeschaltet und dort gespeichert wird und bleibt, bis das Potential am D-Eingang wechselt und ein neuer Clock kommt.

Der Ausgang eines Flipflop wird, wie auch ein Transistor, mit Q bezeichnet. Es ist ja auch ein Transistor, wenn auch integriert.

Mit dem OC-Eingang hat es eine besondere Bewandnis.

Liegt dort H an, wird der Ausgang Q in einen sogenannten **Tri-State** Zustand versetzt.

Wie der Name schon sagt, geht es um einen dritten Zustand. Aus der Schaltungsgebrauch wissen wir, dass eigentlich nur zwei Zustände erlaubt sind, H und L.

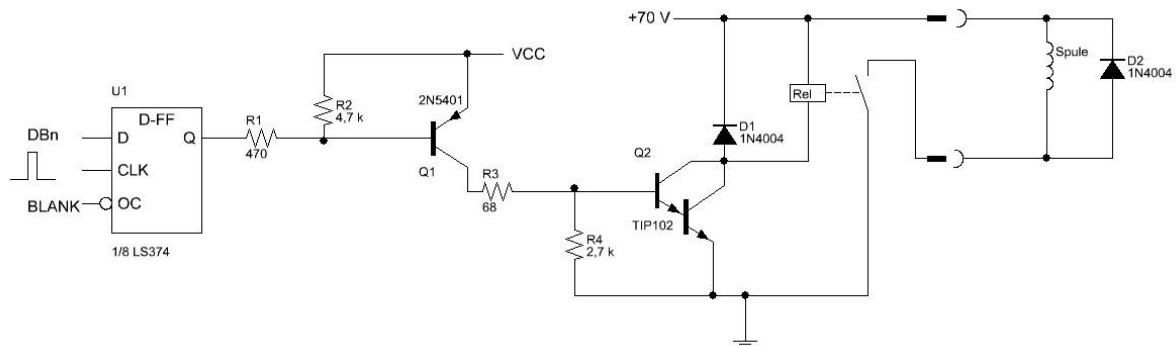
Nun ist es häufig erforderlich, die Ausgänge mehrerer ICs parallel zu schalten, insbesondere am Datenbus. Dann darf natürlich immer nur ein IC zur Zeit „sprechen“. Deshalb werden alle anderen in den Tri-State Zustand versetzt, Ihre Ausgänge werden dann derart hochohmig, dass sie in der Schaltung nicht mehr vorhanden sind. Man kann sie sich schlicht wegdenken.

Diese Eigenschaft wird auch hier genutzt. Bei BLANK, also für eine kurze Zeit nach Einschalten des Stroms, ist U1 im Tri-State Zustand, R1 hängt frei in der Luft, was seinen Anschluss an Q angeht.

Q1 und Q2 sind dann ausgeschaltet.

So, BLANK ist vorbei und Q wurde auf L gesetzt. Es dürfen bei +5 V maximal 16 mA fließen, für die Spule brauchen wir aber bei +70 V mehrere Ampere. Die Transistoren Q1 und Q2 besorgen diese Stromverstärkung, wie das funktioniert, wurde bereits weiter oben beschrieben. Beide sind dann eingeschaltet.

Benötigt die Spule mehr Strom, als ein TIP102 aushält, kann ein Relais dazwischengeschaltet werden, wie die nächste Abbildung zeigt.

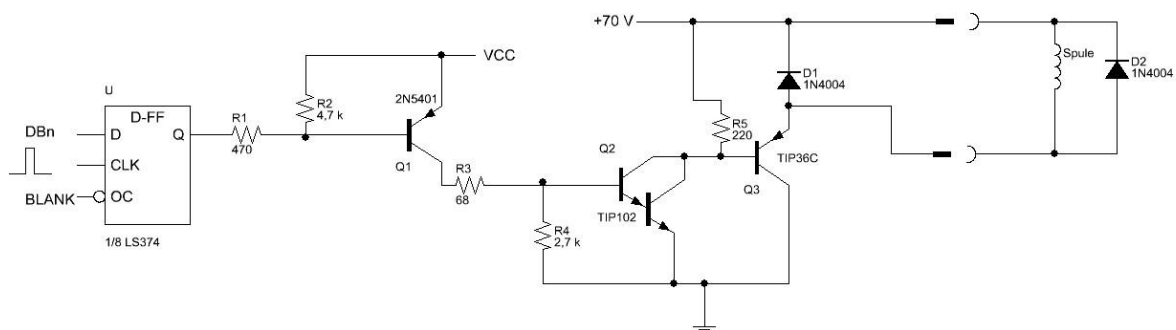


Bei WPC-Geräten finden wir das nur bei einigen frühen Modellen, wo der Strom der Flippespulen über einen Relaiskontakt läuft. Vereinzelt werden sie zudem eingesetzt, wenn exotische Verbraucher oder Wechselstrom-Motoren geschaltet werden müssen.

Bei den Vorgängermodellen wird diese Technik dagegen häufig angewendet. Dort gibt es „schwache“ Spulen, die direkt über Transistoren geschaltet werden. Die Versorgungsspannung für diese Spulen ist geringer. Und „starke“ Spulen, deren Versorgungsspannung und Strom höher sind und die deshalb über einen Relaiskontakt geschaltet werden.

Bei WPC-Geräten ist die Höhe der Spannung für alle Spulen gleich.

Reicht die Belastbarkeit des TIP102 für eine „starke“ Spule nicht aus, wird der Strom durch einen weiteren, höher belastbaren Transistor Q3 einfach noch einmal verstärkt, wie die nächste Abbildung zeigt.



Die Regel, dass alle Verbraucher mit einem Anschluss an der Versorgungsspannung liegen, hat eine wichtige Ausnahme: Die **Gesteuerten Lampen**.

Diese sind wie in einer Tabelle angeordnet, wir kennen diese als die **Lampenmatrix**.

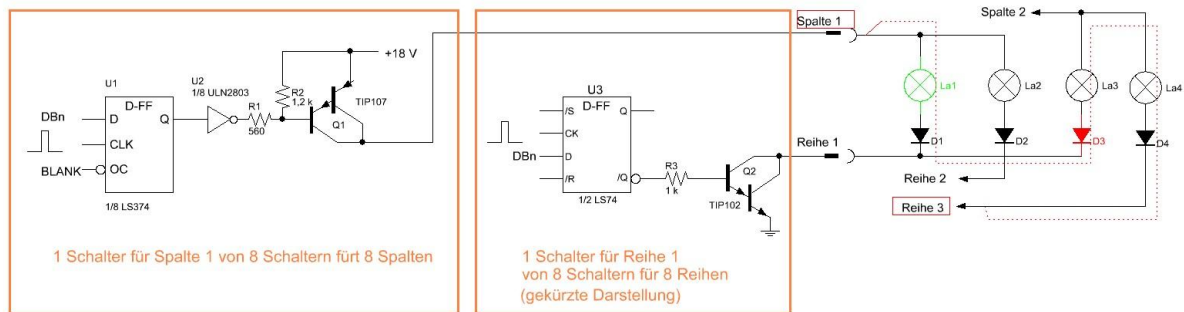
An jede Spalte sind 8 Lampen angeschlossen und an jede Reihe ebenso.

Jede Lampe wird somit an ihrem positiven **und** ihrem negativen Anschluss geschaltet.

Um eine einzelne Lampe einzuschalten, muss der Prozessor daher den für diese zuständigen Reihenschalter und Spaltenschalter schließen.

Es gibt somit 8 Spaltenschalter und 8 Reihenschalter, so dass 64 Lampen einzeln bedient werden können.

Die schaltungstechnische Realisierung zeigt die folgende Abbildung für Spalte 1 und Reihe 1.



Wenn der Prozessor Spalte 1 und Reihe 1 selektiert, sind beide Schalter geschlossen, durch Lampe 1 kann also Strom fließen.

Im linken Teil der Abbildung sehen wir, dass der Spaltenschalter durch einen PNP-Darlington gebildet wird, im rechten, dass als Reihenschalter ein NPN-Darlington dient.

Was hat es nun mit den Dioden auf sich, die bei jeder Lampe in Serie geschaltet sind?

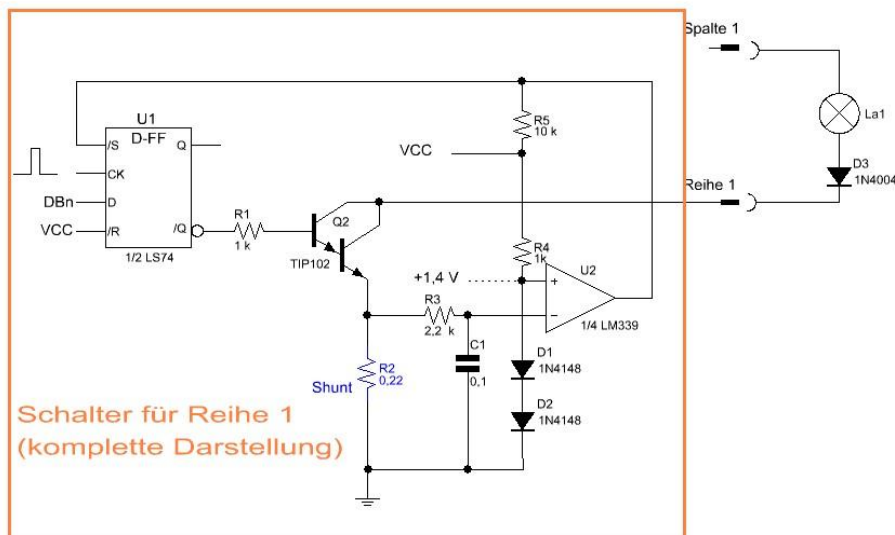
Sie entkoppeln die Spalten- und Reihenleitungen.

Betrachten wir die Konstellation, dass die Schalter für Spalte 1 und Reihe 3 geschlossen sind.

Dann kann durch keine der abgebildeten Lampen Strom fließen, es sei denn, Diode D3 ist defekt, in dem sie in Sperrrichtung Strom durchlässt. Dann würde sich dieser den durch die gestrichelte rote Linie kenntlich gemachten Weg bahnen. Es würden 3 Lampen fälschlich leuchten, wenn auch deutlich dunkler, weil sie dann in Serie liegen.

Der Reihenschalter wurde der Übersichtlichkeit wegen oben nicht vollständig ausgeführt.

Es ist dort noch eine Abschaltautomatik eingebaut, wie wir hier sehen:



Der zusätzliche Komparator U2 schaltet seinen Ausgang auf L, wenn die Spannung an seinem (-) Eingang höher ist, als an seinem (+) Eingang. Letzterer ist fest auf ein Potential von +1,4 V gelegt, wobei unterstellt wird, dass die Durchlassspannung der Diode 1N4148 0,7 V beträgt.

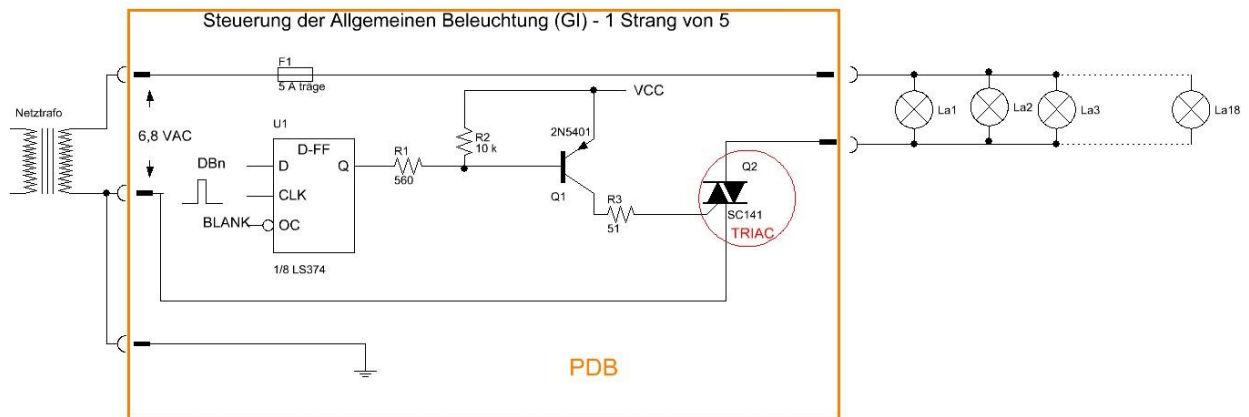
Wenn durch Q2 kein Strom fließt, liegen am (-) Eingang wegen R2 0 V. Der Ausgang von U2 steht also auf H.

Fließt jedoch Strom, muss dieser durch R2 und erzeugt an diesem einen Spannungsabfall, der mit der Stärke des Stroms steigt. Übersteigt die Spannung an R2 den Wert der Referenzspannung von 1,4 V, schaltet der Ausgang von U2 auf L, das dann am Preset (/S) Eingang von U1 anliegt. U1 setzt Q sofort auf H und /Q auf L, Q2 wird gesperrt. Das passiert wegen $I = U/R = 1,41 / 0,22$ bei 6,41 A und mehr.

Ein Kurzschluss in einer Lampe wird so erkannt und soll zu einer so schnellen Abschaltung der zugehörigen Reihe führen, damit die Halbleiter nicht beschädigt werden.

Ein Widerstand, der zur Stromüberwachung eingesetzt wird, ist stets sehr niederohmig und wird als Shunt bezeichnet.

Wir erinnern, dass Schalter mit NPN- oder PNP-Transistoren nur für Gleichstrom geeignet sind. Die meisten Verbraucher in einem Flipper werden mit Gleichstrom betrieben. Eine Ausnahme ist die **Allgemeine Beleuchtung (GI)**, welche die **Dauerlampen** umfasst. Die dort angeschlossenen Lampen werden mit **Wechselstrom** betrieben. Vor den WPC-Generationen wurden diese Lampen mit Relaiskontakten geschaltet. Mit Einführung der WPC-Geräte wurde das geändert. Die Lampen können nicht nur ein- und ausgeschaltet, sondern auch deren Helligkeit kann verändert werden. Dies erfolgt über ein **TRIAC**.



Von dem hier verwendeten TRIAC brauchen wir nur so viel zu wissen, dass er von der Funktion her einem NPN-Transistor ähnelt. ER ist jedoch nicht gepolt und somit zum Schalten von Wechselstrom geeignet.

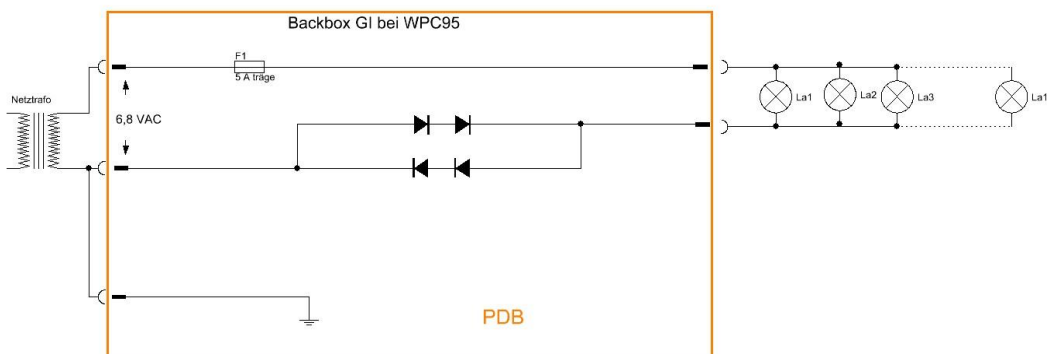
Der wesentliche Unterschied ist, dass er bei hinreichendem Strom in seinen Steuereingang schlagartig einschaltet und so lange eingeschaltet bleibt, bis der Strom im Lastkreis einen bestimmten Wert unterschreitet, den **Haltestrom**, dessen Höhe vom Typ des TRIAC abhängt und typisch 30 mA beträgt.

Zum Einschalten wird er in der gleichen Weise angesteuert wie der Schalttransistor für eine Spule oder einen Flasher, allerdings wird er gezündet. Bei jedem Durchgang der Nulllinie des Wechselstroms schaltet er aus, so dass er dann neu gezündet werden muss.

Das Dimmen erfolgt nun in der Weise, dass er nicht während der ganzen Periode einer Halbwelle eingeschaltet ist, sondern dass die Zündung nach dem Nulldurchgang verzögert wird. U1 steuert diese Verzögerung, synchronisiert durch das Signal ZERO-CROSS.

Entsprechend sinken dann die effektiven Werte von Strom und Spannung an den Lampen.

Es gibt 5 solcher TRIAC-Schalter auf dem PDB, jeder kann maximal 18 Lampen versorgen. Bei einigen WPC95-Geräten werden nur 3 dieser 5 Stränge auf diese Weise geschaltet. Die beiden restlichen, die normalerweise die Lampen in der Backbox versorgen, sind immer eingeschaltet. Auf dem PDB sieht das dann jeweils so aus:



Die Durchlassspannung der TRIACs beträgt etwa 1,2 V. Die Spannung an den durch diese geschalteten Lampen wird deshalb bei voller Aussteuerung von 6,8 V auf 5,6 V reduziert. Um eine ähnliche Spannung bei den Lampen in der Backbox zu erreichen, werden für beide Stromrichtungen zwei Dioden in Serie geschaltet, deren addierte Durchlassspannungen die gewünschte Reduzierung der Spannung an den Lampen erreichen. Diese Dioden werden stark belastet und werden mitunter so heiß, dass sie sich auslöten. Man kann sie überbrücken, dann werden die Lampen entsprechend höher belastet.

Nachtrag:

Feldeffekttransistor.

Es wurden bisher nur **bipolare Transistoren** behandelt.

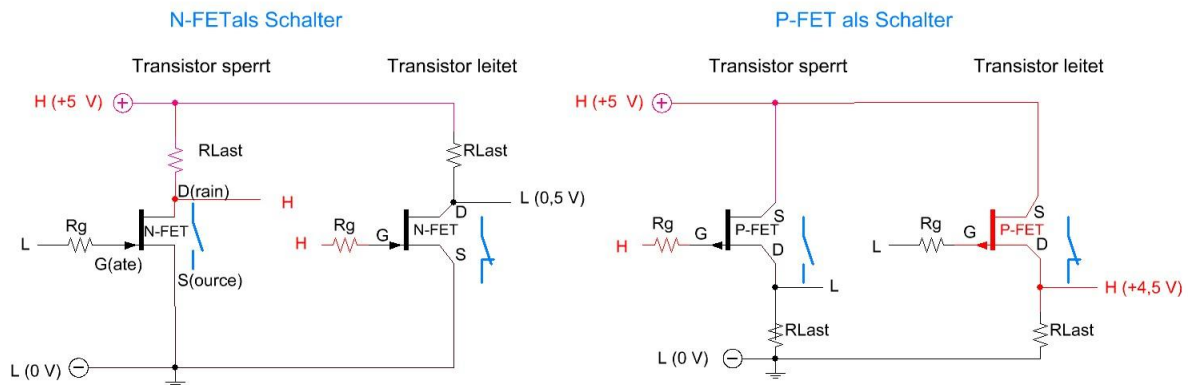
Bei Geräten anderer Hersteller werden auch Feldeffekttransistoren verwendet, abgekürzt **FETs**. FETs sind in ihrer Funktion identisch zu bipolaren Transistoren mit dem wesentlichen Unterschied, dass sie **spannungsgesteuert** sind, während bipolare Transistoren stromgesteuert sind. Bei letzteren muss ein teilweise erheblicher Basisstrom fließen, damit die Kollektor-Emitter-Strecke leitend wird. Dies bedeutet dort, wo der Transistor hohe Ströme schalten muss, schaltungstechnisch einen erheblichen Aufwand, der bei Verwendung von FETs entfällt.

Bei bipolaren Transistoren unterscheiden wir zwischen NPN- und PNP-Versionen.

Analog gibt es FETs in N-Kanal-(N-FET) und P-Kanal-(P-FET)-Ausführung.

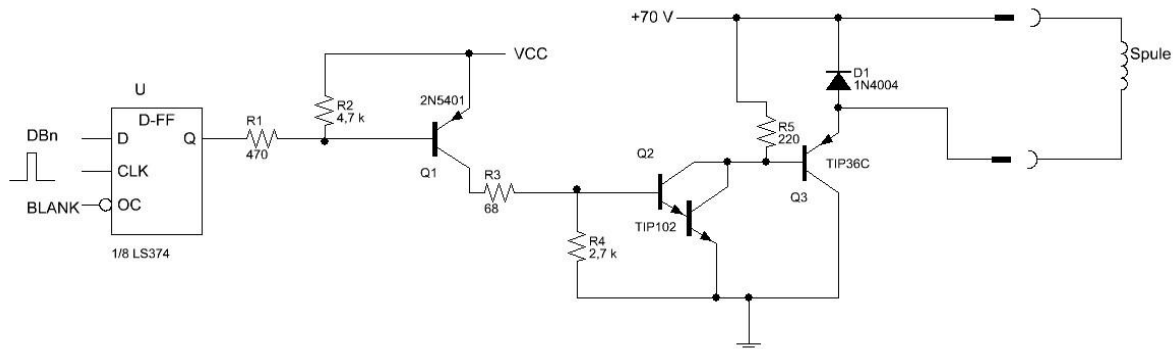
Der N-FET entspricht dem NPN-Transistor, der P-FET dem PNP-Transistor.

Die Anschlüsse werden bezeichnet mit G für Gate (Basis), S für Source (Emitter) und D für Drain (Kollektor). In Klammern stehen die äquivalenten Anschlüsse des bipolaren Transistors.

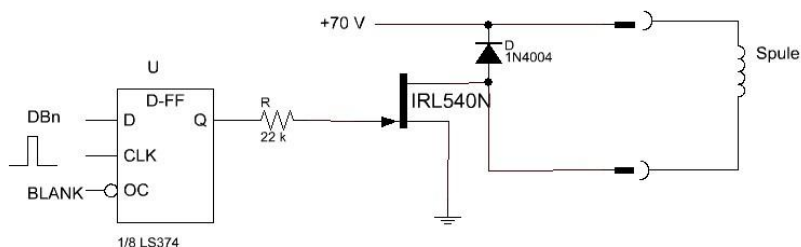


Die vorstehende Abbildung zeigt die Äquivalenz von FET und bipolarem Transistor.

Während drei bipolare Transistoren erforderlich sind, um eine „starke“ Spule zu schalten,



genügt ein N-FET.



Der TYP IRL540N ist übrigens gut und billig verfügbar. Er kann als Ersatz für alle N-FETs im Leistungsbereich verwendet werden wie z.B. STP22NE10L..

Thyristor, auch Silicon Controlled Rectifier (**SCR**) genannt.

Die in der Flipperelektronik eingesetzten Thyristoren sind in ihrer Funktion mit einem NPN-Transistor vergleichbar.

Es gibt drei Anschlüsse: (A)node, (K)athode und (G)ate.

Anode entspricht dem Kollektor, Kathode dem Emitter und Gate der Basis.

Liegt am Gate eine hinreichend hohe Spannung (Zündspannung) in Bezug auf die Kathode an und kann ein ebenfalls hinreichend großer Strom (Zündstrom) fließen, zündet der Thyristor, die Anoden-Kathoden-Strecke wird leitend, er ist eingeschaltet.

Im Gegensatz zu einem Transistor ist der Thyristor ein bistabiler Halbleiter, er kennt nur zwei Zustände, eingeschaltet oder ausgeschaltet.

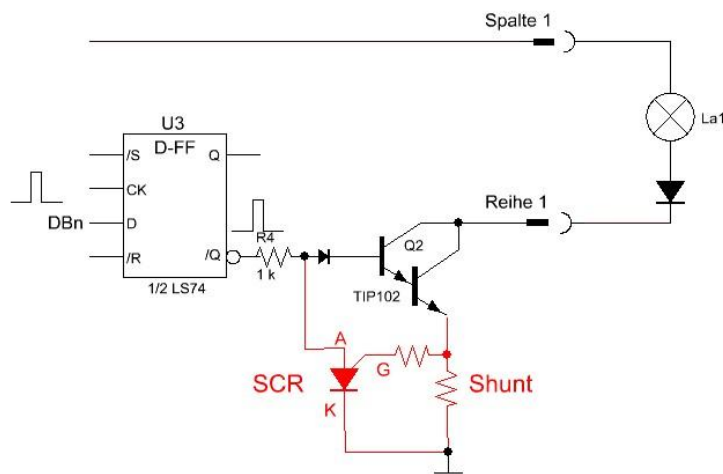
Er kann jedoch (mit Ausnahme weniger Spezialtypen, die hier keine Rolle spielen) über das Gate nicht wieder ausgeschaltet werden.

Er bleibt vielmehr so lange eingeschaltet, bis in seinem Lastkreis der sogenannte Haltestrom unterschritten wird. Dann schaltet er schlagartig aus.

Ein TRIAC, der im Zusammenhang mit der GI erwähnt wurde, ist nichts anderes als zwei antiparallel geschaltete Thyristoren.

Thyristoren werden bei Flippern eingesetzt, um Schalttransistoren bei Kurzschlüssen oder Überlastungen im Lastkreis zu schützen.

Die nachstehende Abbildung macht dies am Beispiel der Lampenmatrix deutlich.



Der Emitter von Q2 wird nicht direkt an Masse gelegt, wie bei WPC-Geräten üblich, sondern über einen Shunt. Das ist ein niederohmiger Widerstand. Mit steigendem Strom wächst die Spannung, die an dem Shunt abfällt. Erreicht diese die Zündspannung des SCR (typisch 3 V), zündet er und wird leitend. In die Basis von Q2 kann dann kein Strom mehr fließen, so dass auch dieser abschaltet, bevor er zerstört wird.

Bei früheren Williams-Geräten und teilweise auch bei denen anderer Hersteller wurde das so realisiert.

Die Schalttransistoren von Spulen ließen sich natürlich auf die gleiche Weise schützen.