

## En analog konstruktion blir till

eller

### Utveckling av en enkel batteriladdare

Den här artikeln har jag skrivit för att visa hur det kan gå till när en analog krets blir till och på så vis kanske lära ut lite analogt tänkande.

Det är vanligt att man kan hitta beskrivningar på hur en fix och färdig konstruktion fungerar, men mindre vanligt att man kan läsa om hur en krets utvecklas från behov och idé till färdig lösning. Alla kretsar som är lite mer komplicerade har förfinats under utvecklingsarbetets gång och resultatet kan i slutändan vara ganska olikt det man startade med. Ser man en sådan färdig konstruktion kan det vara ganska svårt att förstå hur den fungerar och inte minst kan man undra hur någon har lyckats komma på en klurig lösning när man bara ser resultatet och inte alla de små stegen på vägen.

Jag hoppas att den här texten kan vara till nytta för någon som håller på att lära sig konstruera elektronik. Det är kanske mer tveksamt om problemet som kretsen löser är så vanligt att kretsen i sig kan vara till nytta för särskilt många.

Lämpliga förkunskaper är någorlunda känsla för hur bipolära transistorer fungerar samt hygglig känsla för spänning, ström samt Ohms och Kirchhoffs lagar.

### Bakgrund

Mina föräldrar har ett fritidshus där den enda el som finns är från en installation med ett par parallellkopplade 12-V-batterier. På höstkvällarna kan det bli ganska mörkt och ska man då göra något arbete utomhus är en pannlampa ett utomordentligt bra hjälpmedel. Laddningsbara halogenpannlampor av god kvalitet finns det flera i familjen eftersom vi är orienterare. Även om en laddning räcker i mellan två och fyra timmar händer det att man skulle behöva ladda lampan från 12-V-systemet.

Den här artikeln handlar om hur jag konstruerade en krets som möjliggör laddning av pannlampor från 12-V-systemet.

Några bivillkor som inte framgår av texten ovan är:

- Min pappa är rätt slarvig med el och råkar lätt koppla lite fel, så kretsen ska tåla misshandel som t.ex. felvända kablar och kortslutning.
- Pannlampsbatterier för orientering består av fem seriekopplade NiCd- eller NiMH-celler på ca 7 Ah, dvs den nominella spänningen är  $5 * 1,2 \text{ V} = 6 \text{ V}$ .
- En tumregel för lagom laddström vid normalladdning (ej snabb- eller underhållsladdning) är att det nominellt ska ta 10 h att ladda batteriet. I det här fallet kan man alltså sikta på ca 0,7 A laddström. (I praktiken måste man ladda längre än så för att batteriet ska bli fullt.)
- Kretsen ska vara tillräckligt enkel att bygga att man lätt kan göra det på experimentkort.
- Matningsspänningen beror bl a på hur laddat bilbatteriet är. Man får nog räkna med att man åtminstone ska klara spänningar mellan 10 och 14 V.

### Första ansatsen

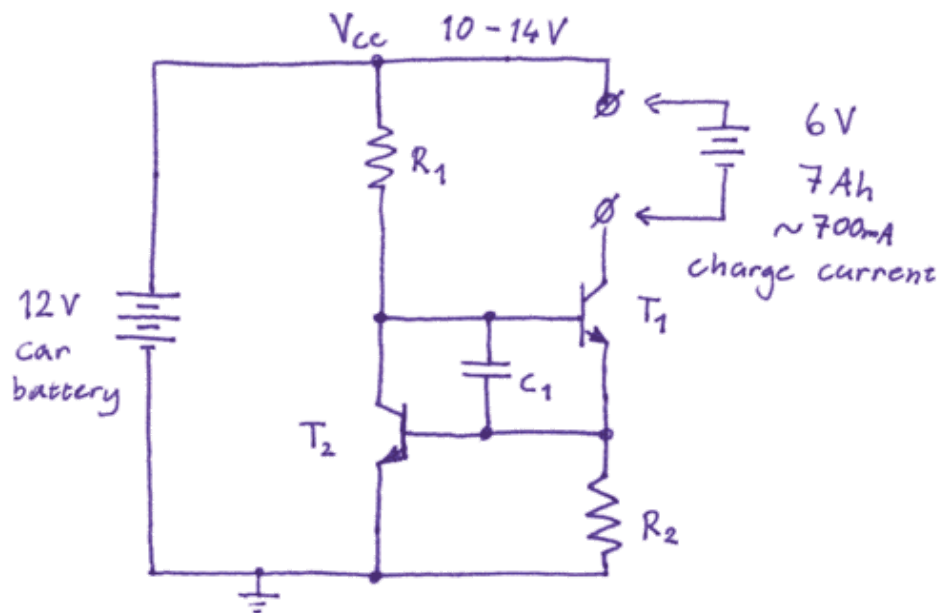
Som den gode pedagogen professor Tom Lee vid Stanford sade under någon föreläsning i radioelektronik:

***"The best way to start is... Well, to start!"***

Alltså, det bästa sättet att börja konstruera en krets är att börja på något sätt (spelar inte så stor roll hur) och sedan förbättra kretsen tills man är klar eller kör in i en vägg och får börja om från början. Man kan sällan räkna med att den första kretsen man skissar på är en tillräckligt bra

lösning, utan det normala är att man måste analysera dess fördelar och svagheter och förbättra den i flera steg innan man har löst problemet.

NiCd- och NiMH-batterier bör laddas med konstant ström och min ansats i det här fallet blev därför att börja med en enkel krets som skapar just en konstant ström. Figur 1 visar vad jag ritade upp på papperet.



**Figur 1: Första ansatsen, en enkel strömkälla.**

Kretsen är en standardkoppling som jag tidigare använt i andra sammanhang för att åstadkomma en hygglig konstantströmkälla. De båda transistorerna utgör en liten negativt återkopplad slinga som reglerar strömmen.

#### Så här fungerar den:

Om vi antar att transistorerna jobbar i sina aktiva områden så ligger basen på T2 ca 0,7 V över jord. Det innebär att spänningen över R2 också är 0,7 V och strömmen därför 0,7 V / R2. Om R2 sätts till 1 Ω så blir det alltså 700 mA genom R2.

Om vi försummar basströmmen i T2 så går all ström genom R2 också genom T1:s emitter och största delen går också genom T1:s kollektor och därmed genom det batteri som ska laddas. 700 mA var ju ungefär den laddström vi var ute efter så detta är anledningen till att R2 sattes till 1 Ω.

Basen på T1 ligger ca 0,7 V över emittern (som vi tidigare kom fram till låg 0,7 V över jord), dvs T1:s bas ligger på 1,4 V. Spänningen över R1 blir då 12 V - 1,4 V = 10,6 V och strömmen genom R1 därmed 10,6 V / R1.

Kondensatorn C sitter där för att eliminera risken för självsvängning som i någon mån finns i alla återkopplade kretsar. Värdet är i detta fall inte kritiskt; vad som helst mellan 100 pF och 1 μF fungerar nog bra. Jag valde lite slumpmässigt 1 nF utan att räkna närmare på det hela.

Det går rätt så mycket ström genom T1 (0,7 A) och om vi antar att det batteri vi laddar kan hålla en så låg spänning som 3 V när det är helt tomt så hamnar 12 V - 3 V - 0,7 V över transistoren. Det resulterar i en effektutveckling på 5,8 W, vilket är en hel del och måste kylas bort. T1 måste alltså vara en effektransistor som kan kopplas termiskt till en kylfläns. En gammal trotjänare i denna kategori är 2N3055 och jag hade några liggande hemma så jag valde att använda den. Man skulle antagligen kunna hitta något billigare alternativ som också klarar uppgiften.

2N3055 har en strömförstärkning  $h_{FE}$  på mellan 20 och 70, vilket innebär att en ganska stor basström krävs, närmare bestämt mellan 700 mA / 20 = 35 mA och 700 mA / 70 = 10 mA. För att

kretsen ska jobba som det är tänkt måste tillräckligt mycket ström levereras av R1 så att även T2 får lite ström att reglera. Värsta fallet är när det krävs 35 mA in i T1:s bas och matningsspänningen är låg, säg 10 V. Det innebär att R1 bara får  $10\text{ V} - 1,4\text{ V} = 8,6\text{ V}$ . För att strömmen genom R1 ska vara minst 35 mA i detta läge måste R1 uppfylla  $R1 < 8,6\text{ V} / 35\text{ mA} = 245\ \Omega$ . Ett standardvärde man kan välja här är 220  $\Omega$ .

Effektutvecklingen i R1 blir som värst när inspanningen är stor, säg 14 V:  $P_{R1} = U_{R1}^2 / R1 = (14\text{ V} - 1,4\text{ V})^2 / 220\ \Omega = 0,72\text{ W}$ . Ett ganska biffigt motstånd behövs alltså och rätt mycket effekt bränns här upp lite i onödan kan man tycka.

Ännu en nackdel är att även om inte batteriet som ska laddas är anslutet så drar kretsen ganska mycket ström. Huvudvägen för strömmen blir då genom R1 och ner genom basen på T1 till R2. Strömmen genom R2 blir i detta fall aldrig stor nog för att T2 ska slå på, utan den bestäms av  $I = (V_{CC} - V_{BE\_T1}) / (R1 + R2) \approx 50\text{ mA}$ . Effektförbrukningen blir därmed  $V_{CC} * I = 0,6\text{ W}$  utan att något vettigt utträttas.

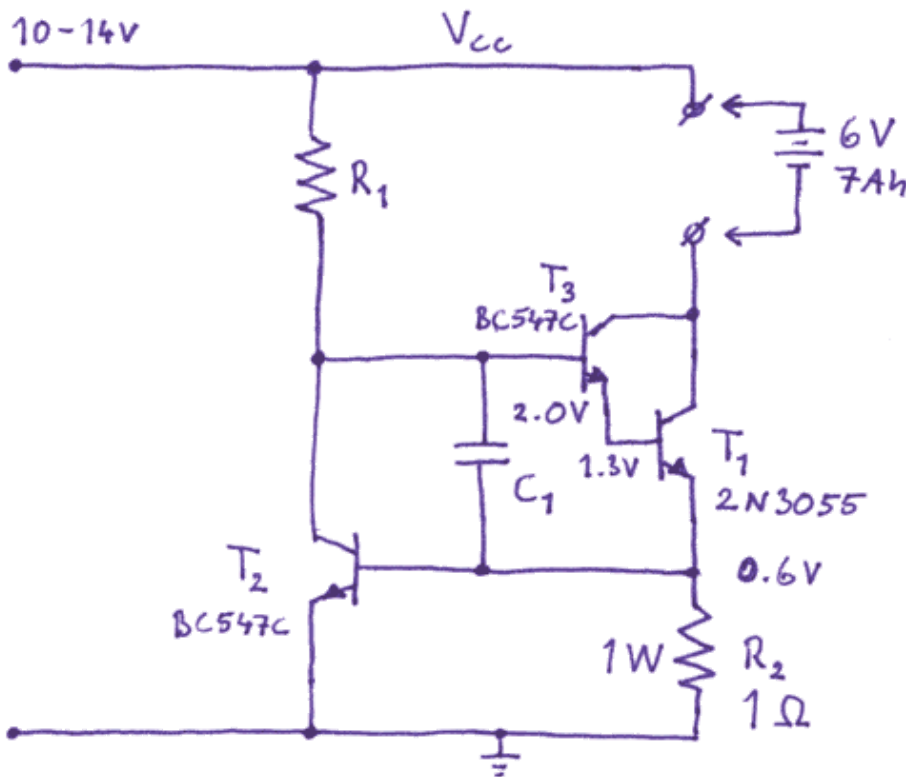
(Kontroll av påståendet ovan att T2 inte slår på: Spänningen över R2 blir  $I * R2 = 50\text{ mA} * 1\ \Omega = 50\text{ mV}$ , så påståendet håller.)

Det finns fler nackdelar med kretsen:

- Om man kopplar in batteriet som ska laddas när inte matningen är inkopplad så kommer batteriet att laddas ur ganska snabbt via R1 och den förspända bas-kollektordioden på T1.
- Om man vänder batteriet baklänges så laddas det ur med 700 mA och processen avbryts inte när batteriet är tomt utan den fortsätter och orsakar polvändning på batteriet, vilket leder till att det förstörs.

## Ökad effektivitet

Även om kretsen löser huvudproblemet att ladda batteriet med konstant ström så gör nackdelarna att det är läge att försöka förbättra kretsen. Om vi börjar med att ge oss på problemen med hög effektutveckling i R1 så kan en enkel lösning på det vara att ersätta T1 med en darlingtonkoppling som via en extra transistor gör att även basströmmen till T1 flyter genom batteriet som ska laddas och därmed gör nytta. Se figur 2 nedan.



## Figur 2: Andra försöket, en darlingtonkoppling har införts.

Basströmmen till T1 - som mest 35 mA enligt uträkning ovan - kommer nu från T3 som tar sin ström från samma nod som kollektorn på T1. T3 hanterar alltså betydligt mycket mindre ström och effekt än T1 och kan vara en enkel småsignaltransistor som t.ex. BC547C med en  $h_{FE}$  på i storleksordningen 300 eller mer. Mest effektutveckling i denna transistor får man vid kortsluten utgång då  $12 - 1,3 \text{ V} = 10,7 \text{ V}$  hamnar över den. Effektutvecklingen blir då  $35 \text{ mA} * 10,7 \text{ V} = 0,4 \text{ W}$ . BC547C tål 0,5 W, så det bör vara ok att använda denna transistor.

Basströmmen till T3 blir liten,  $35 \text{ mA} / 300 = 0,12 \text{ mA}$  eller mindre.

Detta gör också att T2 inte behöver reglera lika stor ström och R1 kan ökas rejält (mer om detta strax). Eftersom kollektorströmmen i T2 då minskar så kommer även basströmmen att minska i motsvarande grad och bas-emitter-spänningen  $V_{BE\_T1}$  minskar till runt 0,6 V, vilket leder till att även spänningen över R2 blir 0,6 V och laddningsströmmen sjunker till ca 600 mA, men detta är acceptabelt. Vill man öka laddströmmen så kan det enkelt göras genom att värdet på R2 minskas till runt 0,85  $\Omega$ , men det är inget som vi bekymrar oss om nu.

Basen på T3 ligger tre diodfall över jord, dvs på  $V_{BE\_T2} + V_{BE\_T1} + V_{BE\_T3} \approx 0,6 + 0,7 + 0,7 \text{ V} = 2,0 \text{ V}$ .

Som sagt så gör den låga basströmmen i T3 att vi kraftigt kan minska strömmen som går genom R1. Säg att vi vill försäkra oss om som minst t.ex. 0,2 mA genom R1 (vi räknade ju nyss ut att T3 som mest behöver en basström på 0,12 mA) så blir ett lämpligt värde:  $(V_{CC\_min} - V_{B\_T3}) / I_{R1} = (10 \text{ V} - 2,0 \text{ V}) / 0,2 \text{ mA} = 40 \text{ k}\Omega$ . 39 k $\Omega$  är ett standardvärde som kan väljas.

Darlingtonkopplingen T3-T1 har gjort att tomgångsströmmen nu är nere på ett par hundra  $\mu\text{A}$  istället för runt 50 mA som den var tidigare. En annan fördel är att även under drift så är kretsen nu mer effektiv eftersom basströmmen till T1 också gör nytta genom att ladda batteriet.

När man förbättrar en egenskap brukar ofta någon annan egenskap bli sämre. Drabbade det oss även denna gång? Tja, kostnaden ökade en aning genom att en extra transistor lades till, men det är helt försumbart så länge man inte ska tillverka särskilt många kretsar. En annan tänkbar nackdel är att utgången inte kan gå lika lågt som tidigare eftersom T3:s kollektor måste ligga åtminstone lite högre än basen på T1 och det gör att även kollektorn på T1 måste ligga högre än basen på densamma. Detta är dock inte en egentlig nackdel i detta fall eftersom vi har så stor spänningsskillnad mellan  $V_{CC}$  och batteriet som ska laddas. (I kretsar med låg matningsspänning kan detta dock vara ett stort problem som gör att man tvingas undvika t.ex. darlingtonkopplingar.)

## Polaritetsskydd

Kretsen kan förbättras ytterligare. Som jag nämnde ovan så är det lite dumt att ett felaktigt inkopplat batteri laddas ur och förstörs om det får sitta i för länge. I detta tillstånd utvecklas också extra mycket värmeeffekt i T1, vilket är skadligt om kylningen inte är dimensionerad för det.

Man kan också tänka sig felfallet att utgången kortsluts. Eftersom utgången beter sig som en strömkälla och inte som en spänningsskälla går det inte mer ström i detta läge än det gör när man normalt laddar ett batteri. Dock blir T1 varmare än vid korrekt användning (men inte lika varm som om ett felvänt batteri kopplas in), så detta fel är inte lika allvarligt.

Att koppla in ett batteri med fel polaritet är ett felfall som känns realistiskt om man har med lite slarviga användare att göra. Nu ska vi försöka bygga in ett skydd mot de negativa följderna av felvänt batteri.

Så här kan man resonera:

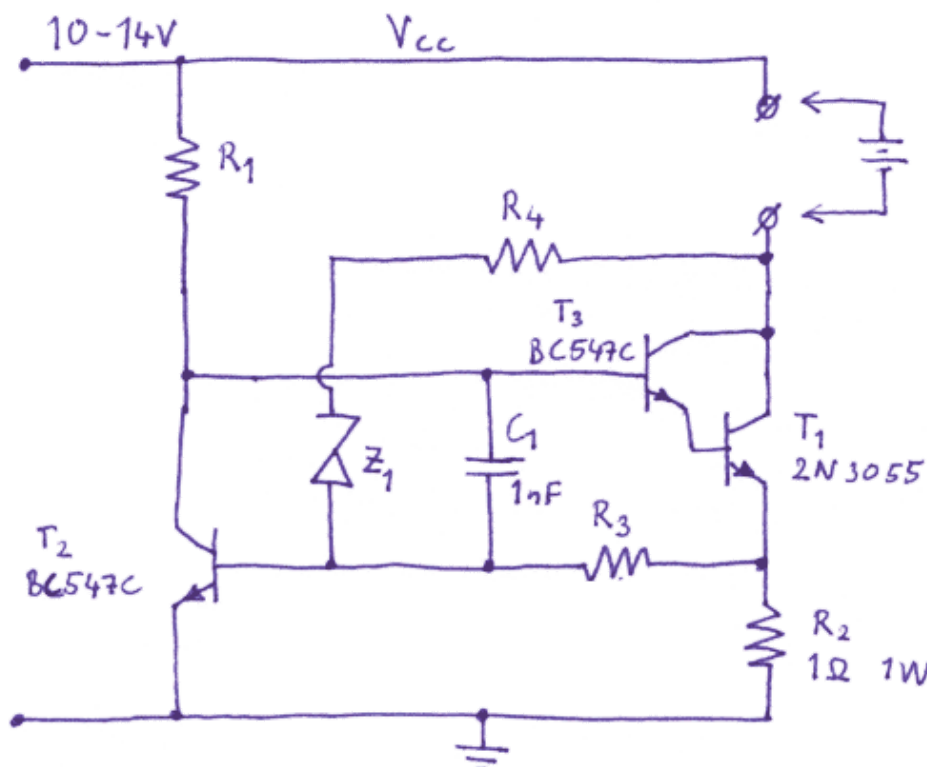
När ett felvänt batteri kopplas in på utgången så åker kollektorn på T1 upp en bra bit över  $V_{CC}$  och det borde man kunna använda för att detektera kortslutningen och stänga av strömmen på något sätt.

Enklarest kanske vore att koppla spänningen från utgången tillbaka till någon nod i kretsen som påverkar utgången på så vis att strömmen stängs av om spänningen i noden stiger. Noden vi söker är basen på T2. Om man ökar spänningen och därmed skickar in mer ström i basen på T2 så öppnar T2 mer, vilket sänker spänningen på basen på T3 så att T3 och T1 leder mindre eller kanske helt slutar leda.

Hur kan man ordna en sådan koppling som dessutom inte försämrar kretsen när utgången inte är kortsluten?

Basen på T2 i den tidigare kopplingen kan inte direkt dras uppåt lätt eftersom man då också måste driva en väldig massa ström genom det lågohmiga R2. Ett enkelt sätt att gå runt detta är att sätta in ett motstånd i serie med basen på T2. Om motståndet väljs tillräckligt litet så att spänningsfallet pga den lilla basströmmen blir försumbart så påverkas inte kretsen i övrigt.

Figur 3 nedan visar hur man med hjälp av bl a en zenerdiod kan koppla utgångsnoden till basen på T2 för att botten T2 när utgången får för hög spänning så att T3 och T1 slås av.



**Figur 3: Tredje ansatsen, en zenerdiod och ett motstånd gör att T2 öppnar och gör så att T3 och T1 stryps om ett felvänt batteri kopplas in på utgången.**

Zenerdioden Z1 gör att inget händer (ingen ström flyter genom Z1 och R4 till basen på T2) så länge som utgången håller sig på normal (tillräckligt låg) nivå. Men när utgången åker upp alltför högt börjar Z1 leda och via motståndet R4 (som begränsar basströmmen till T2 så att den inte brinner upp) leds mer basström till T2 så att den bottenar, drar ner sin kollektor och därmed stryper T3 och T1.

R3 måste vara så pass litet att det inte ger något nämnvärt spänningsfall pga den normala basströmmen till T2 och samtidigt vara så stort att R4-Z1 lätt kan försörja både R3 och basen på T1 med ström. Basströmmen i T2 är som mest ca  $0,2 \text{ mA} / 300 \approx 0,7 \mu\text{A}$ . Om vi accepterar  $10 \text{ mV}$  spänningsfall blir  $R4 = 15 \text{ k}\Omega$ .

Att dimensionera R4 och Z1 kan gå till så här:

Under normal drift kan man tänka sig att ett urladdat batteri kanske är nere i  $3 \text{ V}$  polspänning och med den variation vi har i  $V_{CC}$  innebär det att normal spänning på utgångsnoden kan vara så hög

som mellan 7 V och 11 V. Skyddet får alltså inte slå till förrän över 11 V om man vill att kretsen ska kunna ladda ganska tomma batterier när  $V_{CC}$  är som högst (och det vill man ju).

Vi vill alltså att skyddet ska slå till vid ungefär 11 V.

Om ström ska börja flyta genom Z1-R4 när utgångsnoden ligger på 11 V så bör zenerdioden ha en spänning på  $11 - 0,6 \text{ V} = 10,4 \text{ V}$ . 10 V är ett standardvärde som vi kan försöka med. R4 ska vara tillräckligt litet för att den extra basströmmen ska botten T2 när några tiondels volt ligger över R4. R3 valdes till 15 k $\Omega$  och fick då ett spänningsfall på max 10 mV när basströmmen flöt genom det. Att välja R4 i samma storleksordning borde därför fungera bra.

(Man kan dock notera att tillslaget för detta skydd nog inte blir sådär alldeles abrupt som man kanske skulle önska. Det finns nämligen en dold och oönskad negativ återkoppling i skyddet: När ström börjar flyta genom Z1 så att T2 börjar slå på så minskar strömmen genom T3/T1 och därmed R2. Men spänningen över R2 är ju nedre referensen till spänningsdelaren som utgörs av R4/R3 så nu sjunker basspänningen och -strömmen till T2 och tillslaget motverkas. En lösning på detta problem är att göra R4 betydligt mindre än R3 så att det inte spelar så stor roll att R3 leder bort mer ström från basen ju mer T2 slår på.)

### Återstående problem

Det är ju bra att man skyddar sig mot att förstöra batterier som kopplas in fel, men det vore ännu bättre om laddaren talade om att batteri är fel inkopplat så att man uppmärksammas på problemet och kan åtgärda det direkt.

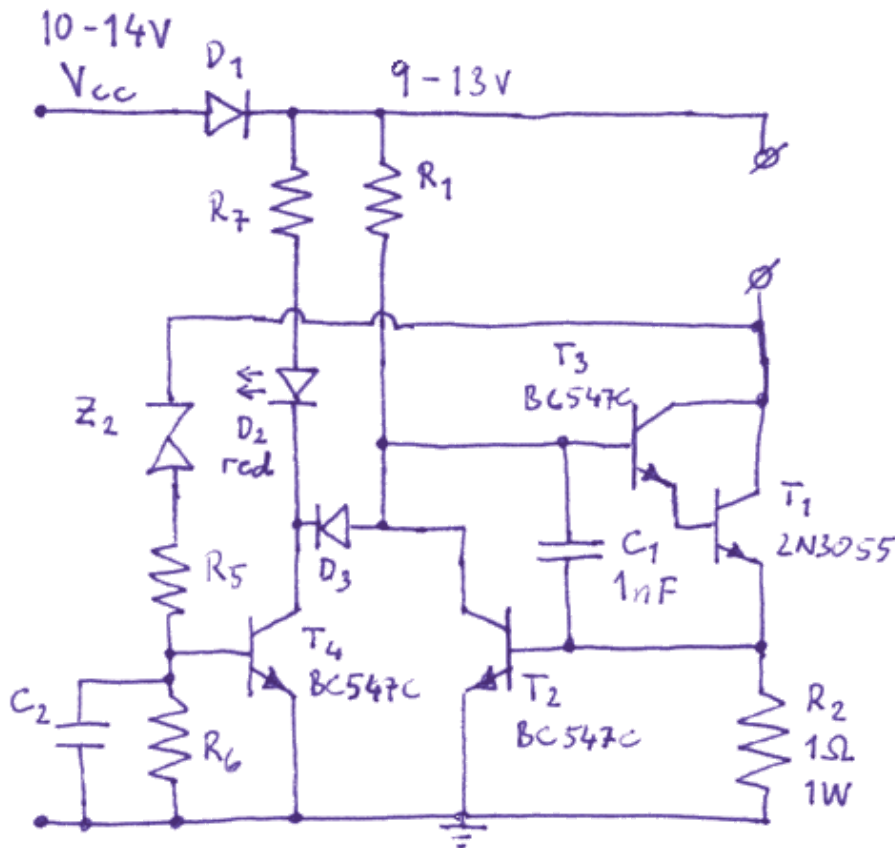
En annan sak som kanske borde vara införd i kretsen för länge sedan är skydd mot fel polaritet på matningssidan. Det är lätt åtgärdat med en diod i serie med ingången.

### Felindikering och mer polaritetsskydd

Det enklaste sättet att varna för fel är nog att tända en röd lysdiod. Vi måste bara hitta på ett sätt att få lagom mycket ström att flyta genom lysdioden när felet uppstår.

När felet upptäcks av kretsen så slår T2 till fullt och en massa extra ström flyter genom kollektorn på T2. Tyvärr så flyter ju ström denna väg även i vanliga fall (om än inte lika mycket), så vi kan inte direkt använda denna ström för att tända lysdioden. En annan sak som händer vid fel - och som skulle kunna användas för att tända lysdioden - är att kollektorn på T2 sjunker från ca 2,0 V till nära 0 V. Om man kopplar in en extra transistor som känner av kollektorspänningen på T2 så kan man få extratransistorn att slå av vid fel. Fast vi behöver en transistor som slår på vid fel för att tända dioden, så ännu en transistor behövs för att fixa detta. Lite klumpig lösning kan tyckas med två extra transistorer bara för att tända en lysdiod.

Vi provar en annan variant istället. T2 slår som sagt på extra mycket vid fel och sänker därmed basen på T3. Om vi inte använder T2 för att sänka spänningen på basen på T3 utan kopplar in en extra transistor som drivs av zenerkopplingen parallellt med T2 så har vi plötsligt en transistor som normalt är avslagen, men som slår på vid fel. Detta är användbart för oss, se figur 4 nedan.



**Figur 4: Fjärde ansatsen, transistorn T4 har lagts till för att få en separat strömväg som slår till vid fel och som kan användas för att tända en lysdiod.**

I figur 4 ovan har dioden D1 lagts till för att skydda mot felvänd polaritet på ingången. En vanlig 1N4001 eller liknande som tål 1A eller mer kan användas.

T4 är parallellkopplad med T2 och slår till vid fel på samma sätt som T2 gjorde förut. Finessen med att lägga till T4 är att den leder ström bara när ett fel uppstått och kan därför användas för att tända en lysdiod vid fel.

En naturlig första ansats för att fason på lysdioden vore kanske att koppla in den i position D3 (glöm för ögonblicket D2/R7). Nackdelen med detta är dels att spänningsfallet över en röd lysdiod kan vara så stort (uppåt 2 V) att T3/T1 inte slår av helt och dels att man vore tvungen att minska R1 rejält för att D3 ska lysa tillräckligt väl. Att minska R1 ökar som vi sett tidigare tomgångsförbrukningen för kretsen och känns lite onödigt eftersom det alltså försämrar egenskaperna under normal drift för att förbättra egenskaperna vid fel.

En bättre lösning är den som visas i figuren där D2/R7 kopplats in nästan parallellt med R1, och D3 lagts till för att inte D2/R7 ska lysa vid normal drift.

Spänningsdelaren R5/R6 kan användas för att fintrimma vid vilken spänning som T4 ska slå till. Skillnaden mot den liknande spänningsdelaren R4/R3 tidigare är att matningsspänningen pga D1 sjunkit med ca 1 V och att R5/R6 delar spänning mellan katoden på zenerdioden och 0 V istället för mot 0,6 V. (I detta fall finns inte problemet att den undre spänningen sjunker och motverkar tillslaget när skyddet börjar slå till.)

För att undvika att skyddet slår till av misstag vid tillfälliga transienter så har C2 lagts till.

## Dimensionering

I det här fallet ska skyddet aktiveras när utspänningen är ca en volt lägre än tidigare (pga spänningsfallet över D1), dvs vid 10 V. T4 slår till när dess basspänning kommer upp till ungefär 0,6 V, så spänningen över zenerdioden ska vara lägre än 9,4 V. 8,2 V är ett standardvärde som vi kan använda och så kan vi välja värden på R5/R6 som gör att tillslagsspänningen blir som önskat.



Skyddet kommer inte bara att upptäcka felvänd polaritet på batteriet som ska laddas, utan även en ren kortslutning på utgången om bara bilbatteriet håller tillräckligt hög spänning.

Ungefär 10 mA är en lämplig ström för en lysdiod. Det gör att R7 kan väljas till  $R7 = (V_{CC} - V_{D1} - V_{D2} - V_{T4\_CE\_SAT})/10 \text{ mA} \approx (12 \text{ V} - 1 \text{ V} - 2 \text{ V} - 0,2 \text{ V})/0,01 \text{ A} \approx 880 \Omega$ . Om vi snålar lite med strömmen så blir 1 k $\Omega$  bra.

Basströmmen på T4 är minst 300 gånger mindre än kollektorströmmen (som till största delen utgörs av lysdiodströmmen eftersom R1 är så mycket större än R7). 33  $\mu\text{A}$  kan vi alltså räkna med ungefär. Det gör att vi kan börja dimensionera R5 och R6. För att det ska bli enkelt att räkna och vi inte ska vara så beroende av  $h_{FE}$  på T4 så väljer vi en ström genom R5/R6 som är minst 10 gånger större än basströmmen när skyddet slår till.

Spänningen över R6 ska vara 0,6 V vid tillslag:  $R6 = 0,6 \text{ V} / (10 * 33 \mu\text{A}) = 1,8 \text{ k}\Omega$  (ett standardvärde!).

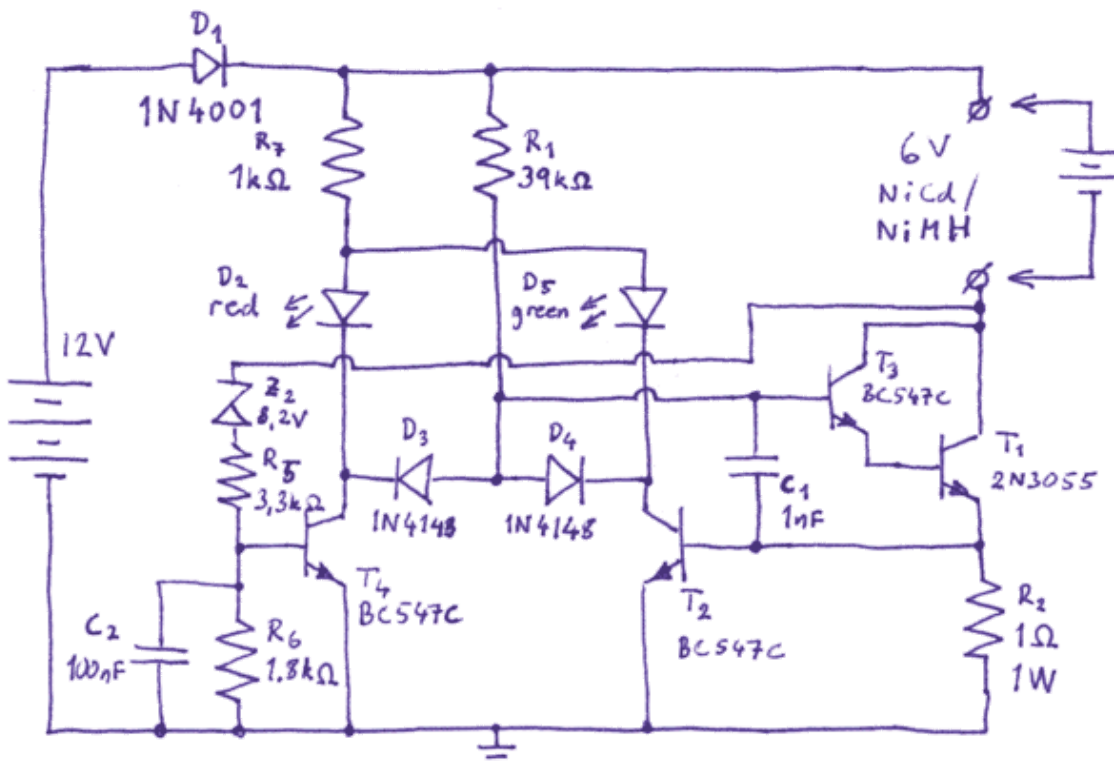
Spänningen över R5 ska vid tillslag vara:  $10 \text{ V} - 8,2 \text{ V} - 0,6 \text{ V} = 1,2 \text{ V}$ . R5 blir därmed  $1,2 \text{ V} / 330 \mu\text{A} = 3,6 \text{ k}\Omega$ . Man kan här välja att bygga R5 av två 1,8 k $\Omega$ -motstånd, men vettigare är nog att välja standardvärdet 33 k $\Omega$ .

C2 sätts lite godtyckligt till 100 nF, vilket ger en tidskonstant på  $T_{RC} = R5 || R6 * 100 \text{ nF} = 0,1 \text{ ms}$ . Detta ger en uppfattning om hur långa transienter som blockeras. Ett betydligt större kondensatorvärde hade kanske varit bättre, men det är inte så noga.

Inga särskilda krav ställs på D3. En vanlig 1N4148 duger utmärkt.

## Finputsning

Lysdioder som lyser är ju trevligt och nu har vi en diod som indikerar att ett fel uppstått. Varför inte bygga in en diod som indikerar att batteriet laddas också?



**Figur 5: Femte försöket, en indikering av att normal laddning pågår har lagts till.**

Detta kan göras ganska enkelt. Vi tillämpar samma teknik som vid förra lysdioden. I det här fallet har vi T2 som leder när batteriet ska laddas och lysdioden ska lysa. D4 och D5 har lagts till på samma sätt som D2 och D3. Först hade jag ett separat motstånd mellan anoden på D5 och matningsspänningen, men sedan insåg jag att D2 och D5 aldrig lyser samtidigt, så det går faktiskt



att dela förkopplingsmotstånd mellan dessa dioder och på så vis spara in ett motstånd. Hade det funnits ett läge då båda hade lyst samtidigt så hade det inte gått att dela R7 mellan dessa dioder, eftersom den lysdiod som har lägst spänningsfall (den röda) då skulle få all strömmen och den gröna inte skulle lysa alls.

Man kan notera att den ökade strömmen som nu måste ledas av T2 gör att dess basspänning åker upp några tiotals mV, vilket medför att spänningen över R2 och därmed laddningsströmmen också ökar i motsvarande grad och kanske närmar sig 700 mA igen.

När kretsen laddar som vanligt leder T2 och reglerar spänningen till basen på T3 samtidigt som den även tvingas leda strömmen som krävs för att D5 ska lysa. När polaritetsskyddet (T4 etc) har slagit till får inte T3 och T1 någon basström och därmed kommer ingen ström att flyta genom R2. Därmed är T2 avslagen och D5 är släckt medan D2 lyser.

Om inget batteri kopplas in för laddning flyter en liten basström från R1 genom T3 och T1, men ingen ström kommer via utgången in på kollektorn på T1 och därmed flyter bara en mycket liten ström genom R2 som gör att T2 inte får tillräckligt med basspänning för att börja leda. Därmed är både D2 och D5 släckta i detta fall.

## Sammanfattning

Det här är kretsen jag nöjde mig med och byggde ihop i en liten låda av strängpressad aluminium som också fick fungera som kylfläns åt T1. Laddaren har fungerat bra och klarat den användning den utsatts för.

Den slutliga kretsen jag kom fram till ser kanske lite krånglig ut om man ser den direkt, men om man följer stegen på vägen som ledde fram till den från en enkel skoleboks-mässig strömkälla så hoppas jag att den känns begriplig, både i hur den fungerar och hur jag gjorde för att komma fram till lösningen. Vidare hoppas jag att jag lyckats förmedla något om hur man kan resonera när man konstruerar och dimensionerar nya kretsar. Kanske har jag även lyckats inspirera någon att ge sig på andra analoga konstruktioner.

## Fortsatt arbete

Det här har varit en liten övning i design med diskreta transistorer med målet att hitta en robust men ändå någorlunda okomplicerad lösning på ett verkligt problem som jag stött på. Om man skulle ha andra bivillkor på lösningen av problemet skulle man kunna tänka sig att bygga en batteriladdare med betydligt mer finesser, som t.ex.:

- Automatisk avkänning av när batteriet är fullt. Som det är nu måste man själv hålla reda på när det är dags att avbryta laddningen.
- En switchad step-down-omvandlare (buck-regulator) som utnyttjar energin från bilbatteriet bättre än att bränna upp överbliven spänning i en transistor.
- Snabbladdning som laddar med högre ström i början av laddningsförloppet.

Man kan göra en laddare ungefär hur komplicerad som helst, men här var det viktigare att det gick snabbt och enkelt att bygga ett exemplar av laddaren än att den skulle ha alla tänkbara finesser.

## Vidare läsning

En del av inspirationen till den här artikeln har kommit från följande böcker:

- [Analog Circuit Design, Art Science and Personalities](#)
- [The Art and Science of Analog Circuit Design](#)

Jag rekommenderar dessa böcker varmt för alla som är intresserade av analog elektronik.