



CHALMERS



Solcellsladdade batterier

-Det nya sättet att ladda med solens energi

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Elektroingenjör

DAVID GRUNDBERG & JOAKIM OLOFSSON

Solcellsladdade batterier
-Det nya sättet att ladda med solens energi
DAVID GRUNDBERG
JOAKIM OLOFSSON
Institutionen för elektroteknik
Chalmers tekniska högskola

Förord

Denna rapport beskriver genomförandet av ett examensarbete om 15 högskolepoäng. Examensarbetet utfördes vid Broccoli Engineering under våren 2018 och är det avslutande momentet i David Grundbergs och Joakim Olofssons elektroingenjörsexamen vid Chalmers tekniska högskola.

Vi vill tacka Björn Bergholm och Petra Panzar vid Broccoli för många goda ideér och ert stora stöd. Vi vill även tacka Fredrik Bülow som var till mycket stor hjälp då våra kretskort lödades.

Ett riktigt stort tack vill vi rikta till vår handledare Jesper Pedersen vid institutionen för elektroteknik, Chalmers tekniska högskola för goda kommentarer och synpunkter under arbetes gång och färdigställandet av denna examensrapport. Tillsist vill vi tacka vår examiner Fredrik Brännström vid Institutionen för Elektroteknik, Chalmers tekniska högskola.

David Grundberg & Joakim Olofsson, Göteborg, maj 2018

Sökord: Solceller, batterier, batteriladdning.

Sammanfattning

Återuppladdningsbara batterier är att föredra framför engångsbatterier då de som namnet antyder, är återuppladdningsbara. Då ett återuppladdningsbart batteri kan laddas över 1000 gånger innan det förbrukats, bidrar det till att tillverkning av batterier kan minskas, vilket är bra ur miljösynpunkt. Nackdelen är att de behöver en extern laddare för att laddas upp, vilket gör det jobbigt att använda dem. Därför är det av intresse att konstruera ett batteri som kan laddas utan extern laddare. De främsta utmaningarna för att lyckas med det är att ett kretskort ska rymmas inuti anordningens kapsel samt att finna tillräckligt effektiva solceller. Organiska solceller är flexibla vilket ger stor plats inuti kapseln men dessa är inte tillräckligt effektiva. Monokristallina solceller har en högre verkningsgrad men tar större plats. Med de sistnämnda solcellerna monterade på kapseln fick kretskortet plats inuti, men batteriet fick placeras utanpå.

En prototyp konstruerad med en mikroprocessor, monokristalina solceller, och ett knappcells batteri visade sig vara en bra lösning. Resultaten visar att det är fullt möjligt att konstruera ett solcellsladdat batteri, men med begränsningar.

Av utrymmesskäl har prototypen låg batterikapacitet. Med mer effektiva flexibla solceller skulle en större volym erhållas inuti kapseln och på så sätt rymma andra typer av batterier med bättre kapacitet. Vi tror att i framtiden kommer mer effektiva solceller existera vilket öppnar upp för nya möjligheter att förbättra vår konstruktion. Vi tror därför att lösningar inte helt olik vår kommer ersätta dagens återuppladdningsbara batterier.

Abstract

Rechargeable batteries are to be preferred to disposable batteries because as the name implies, they are rechargeable. A rechargeable battery can be recharged over a thousand times before it needs to be recycled, this makes them far better for the environment than disposal batteries, since they could eventually reduce the manufacturing of disposal batteries. The inconvenience of recharging these batteries is however a huge drawback. This is why creating a battery that can recharge without an external recharger is of interest. The greatest challenges in creating this where to create a circuit board, small enough to fit inside the casing of the recharger, as well as finding solar cells with high enough efficiency. Organic solar cells are very flexible which indirectly creates a larger space inside the capsule. These however are not efficient enough. Monocrystalline solar cells are more efficient but larger. With monocrystalline solar cells mounted on the capsule there was enough space inside to fit the circuit board. The battery however had to be mounted outside of the capsule.

A prototype consisting of a micro controller, monocrystalline solar cells and a button-cell battery turned out to be a good solution. The results show that it is possible to create a solar charged battery, but with limitations.

With the limited volume inside the capsule followed a low battery capacity. With more efficient flexible solar cells a larger volume inside the capsule will follow. A larger volume can house different batteries with better capacity. We believe that more efficient solar cells will exist in the future. This will open up to possibilities of improving our prototype. Which is why we believe that solutions not unlike ours will be the rechargeable batteries of tomorrow.

Innehåll

Figurer	xi
Tabeller	xiii
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Avgränsningar	1
1.4 Precisering av frågeställning	2
2 Teoretisk bakgrund	3
2.1 Solceller	3
2.1.1 Grundläggande principer	3
2.1.1.1 Ekvivalent kretsschema av en solcell	6
2.1.2 Organiska solceller	8
2.2 Batterier	8
2.2.1 Primära och sekundära batterier	9
2.2.2 Laddning	9
2.3 Laddningsregulator	10
2.4 DC-DC omvandlare	10
3 Metod	13
4 Material	15
5 Analog konstruktion	17
5.1 Krets och simulering	17
6 Digital konstruktion	19
6.1 Val av solceller	19
6.2 Konstruktion av laddkrets	20
6.2.1 Buck-Boost TSP63030	22
6.2.2 Övriga komponenter	23
6.3 Laddningsalgoritm	23
7 Resultat	25
7.1 Analog	25

7.2	Digital	26
7.2.1	Uppmätning av solceller	26
7.2.2	Kretsens konstruktion	27
8	Diskussion	29
9	Slutsats	31
	Referenser	33
A	Appendix 1	I
A.1	Laddningsalgoritmens källkod	I

Figurer

2.1	<i>Kisels atomstruktur, där strecken representerar en elektron. Varje atom har fyra valenselektroner.</i>	4
2.2	<i>En elektron som träffas av en foton med energi $h\nu > E_G$ förflyttas från valensbandet till ledningsbandet, där h är Plancks konstant och v är fotonens hastighet.</i>	5
2.3	<i>En typisk p-n övergång där elektroner och hål diffunderat till vardera sida. I mitten uppstår det elektriska fältet.</i>	6
2.4	<i>Ekvivalenta scheman för en solcell. Där (a) är en mer detaljerad beskrivning av en solcell och (b) är en förenklad beskrivning.</i>	7
2.5	<i>Elektronerna vandrar från katoden till anoden vilket ger upphov till en elektrisk ström.</i>	8
2.6	<i>Typiskt Laddningskarakteristik för NiMH- och Litium-batterier</i>	10
2.7	<i>En typisk buck-boost omvandlare.</i>	11
2.8	<i>Överst: Spolens momentatna spänning. Under: Spolens momentana ström.</i>	12
5.1	<i>Den analoga krets som ska ladda batteriet [14].</i>	17
6.1	<i>Bild över de olika uppsättningarna som mätningar utfördes på. FV, cirkulär montering av 8 celler, parallellkoppling av två celler och serie koppling av två celler.</i>	20
6.2	<i>Kretsschema för den reglerande laddkretsen.</i>	21
6.3	<i>Rekommenderad koppling av DC-DC omvandlaren [16].</i>	22
6.4	<i>Figuren visar tanken som ligger till grund för mikrokontrollerns evaluering av spänningen U_{PIC}.</i>	24
7.1	<i>Ström/spänningskarakteristik för den simulerade kretsen i 5.1.</i>	26
7.2	<i>Graf (a) visar $\frac{1}{2} \cdot i_{L,topp}$ som funktion av spolens storlek i mH. Graf (b) visar I_L som funktion av den inkommande strömmen från solcellerna i mA.</i>	27
7.3	<i>Till vänster: kretskortets ovan sida. Till höger: kretskortets undersida.</i>	28
A.1	<i>Källkod för batteriladdningen</i>	II

Tabeller

7.1	<i>Mätning av $V_{\text{Ö}}$ och I_{K} för infinity PV's solcell, samt två stycken solceller i serie respektive parallellt från IXYS.</i>	25
7.2	<i>Mätning av $V_{\text{Ö}}$ och I_{K} för 8 stycken seriekopplade solceller, respektive 4 stycken seriekopplade parallellt med 4 stycken seriekopplade solceller från IXYS.</i>	26
7.3	<i>Uppmätt $V_{\text{Ö}}$ och I_{K} från den första cirkulära prototypen.</i>	26

1

Inledning

1.1 Bakgrund

Idag förutsätts det att energi finns när den efterfrågas, energi som lagras i batteri är ett exempel på en energikälla som ofta byts ut och ersätts med ett nytt när batteriet är förbrukat. Ett mer miljövänligt alternativ är att använda uppladdningsbara batterier. Enligt [1] förbrukas 3400 ton engångsbatterier samt 66 ton uppladdningsbara batterier årligen i Sverige. Om alla istället skulle gå över till att använda uppladdningsbara batterier skulle vi kunna använda 325 ton färre batterier [1]. Uppladdningsbara batterier återuppladdas genom att placeras i en laddare som ansluts till ett vägguttag. Denna proceduren är föråldrad och krånglig men genom att avlägsna behovet av en laddare skulle fler välja att köpa uppladdningsbara batterier istället för engångsbatterier. I samråd med Broccoli Engineering har vi diskuterat möjligheten att använda solenergi för att ladda batterier utan att placera dem i en laddare, det vill säga den ska vara integrerad i batteriet.

1.2 Syfte

Syftet är att konstruera en solcellsdriven batteriladdare. Laddaren ska hålla samma storleksformat som ett AA-batteri. Den ska innehålla ett mindre integrerat batteri och ha den stora fördelen av att aldrig behöva avlägsna detta då det ska användas. Annordningen ska istället användas som ett vanligt batteri som har möjligheten att laddas i solen med hjälp av de omkringliggande solcellerna.

1.3 Avgränsningar

Då batterier och solceller är ett stort område, kommer projektet inte undersöka dessa i avseende av att konstruera eller utveckla dem. Utifrån arbetets tidsaspekt kommer fokus istället att ligga på att välja befintliga komponenter som passar till laddningsanordningens kapsel.

1.4 Precisering av frågeställning

1. Vilka typer av solceller finns det och är någon av dessa tillräckligt tunn och flexibel för ändamålet?
2. Hur stor spänning går det att få ut ifrån en solcell som är cirkulärt lindad?
3. Kan man med denna spänning ladda ett batteri, eller behövs en DC-DC omvandlare för att anpassa spänningen?
4. Hur lång tid tar det att med denna energin ladda upp ett batteri?
5. Går det att skapa en krets som inte laddar ur batteriet?
6. Är det möjligt att gå "plus" i uppladdad energi under ett dygn?
7. Går det att skapa en underhållsladdande funktion som inte påverkar batteriets livstid?
8. Är det möjligt att konstruera en fungerande prototyp?

2

Teoretisk bakgrund

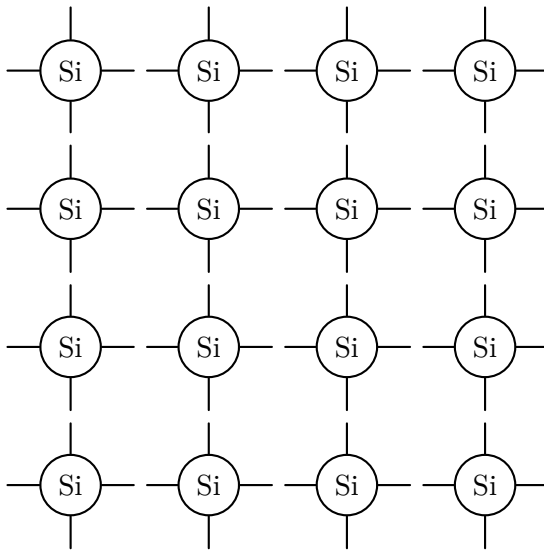
I följande kapitel presenteras den teori som ligger till grund för de system som använts i konstruktionen av laddningsanordningen.

2.1 Solceller

En solcell är en diod som på ett noggrant sätt konstruerats så att den kan absorbera ljus, som sedan omvandlas till en spänning. En traditionell solcell konstrueras av halvledare, exempelvis Kisel, men det finns också organiska solceller vilka är konstruerade av molekyler som består av kolatomer [2]. Trots att de är uppbyggda på olika vis följer de samma fysikaliska principer [3].

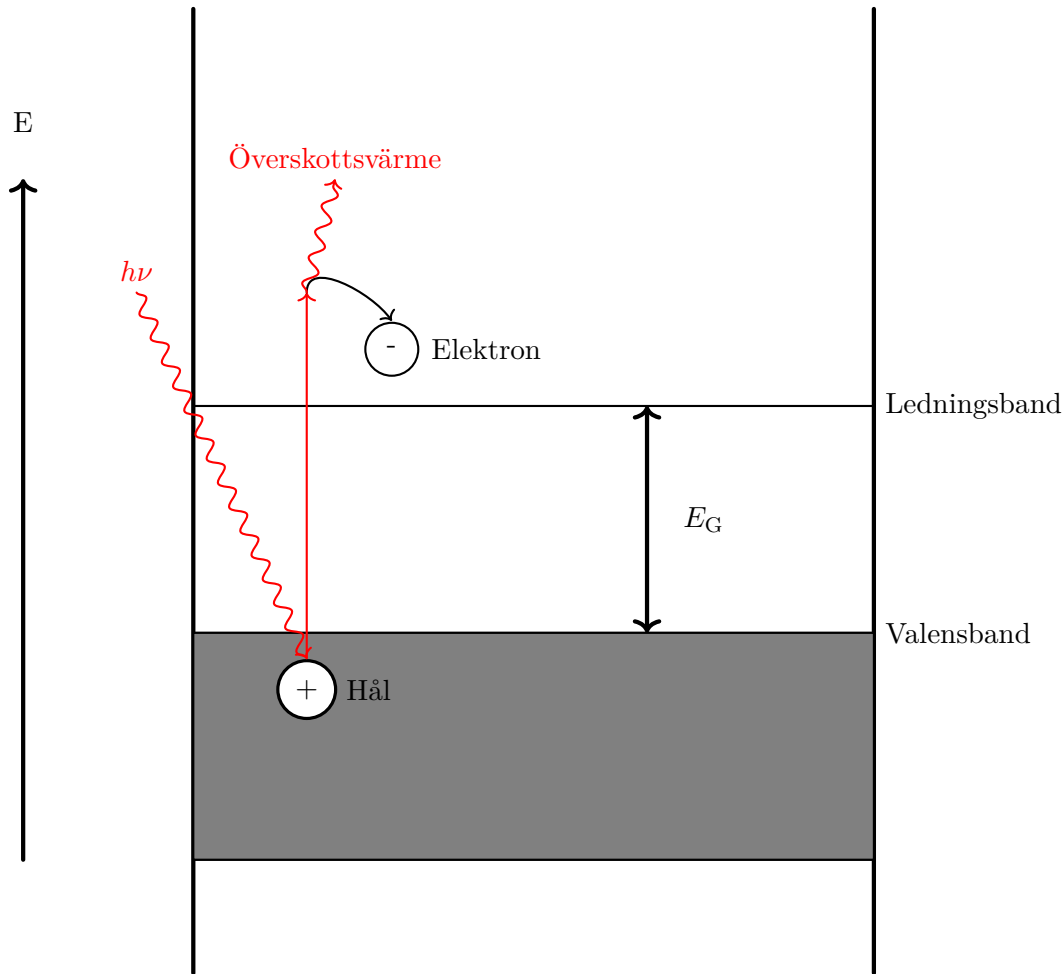
2.1.1 Grundläggande principer

Idag är det vanligast att halvledare av Kisel används i konstruktionen av solceller men även Germanium (Ge), Selen (Se) och Galliumarsinid (GaAs) är vanligt förekommande alternativ. Vanligast förekommande är det med monokristallint Kisel, men också polykristallint Kisel förekommer [2]. Det kristallina kiset tillverkas i ett helt stycke, där valenselektronerna är sammanbundna i ett rutnät även kallat kristalliskt gitter [4]. Kisel, som har fyra valenselektroner, vill binda sig till fyra grannatomer [5]. Polykristallint Kisel å andra sidan är sammanfogat av flera små bitar av kristallint Kisel. Figur 2.1 visar hur Kiselatomer binder sig till varandra.



Figur 2.1: Kisels atomstruktur, där strecken representerar en elektron. Varje atom har fyra valenselektroner.

En halvledare karakteriseras av atomernas bandgap, den energin, E_G , som måste tillföras för att en valenselektron skall frigöras och bli fritt ledande [4]. Minst lika viktigt är materialets förmåga att absorbera ljus. Kisel har en absorptionsförmåga för frekvenser nära solens spektrum, därav så vanligt förekommande [6]. Eftersom Kislets elektroner till huvudsak är hårt bundna till sina kärnor fungerar det som en isolator då det inte belyses, men då en halvledare utsätts för strålning i form av fotoner från solen frigörs en valenselektron som blir fritt rörlig. Valenselektronerna frigörs från det så kallade valensbandet och förflyttas med hjälp av fotonens energi till det så kallade ledningsbandet, där banden är energinivåer som elektroner kan anta då energi tillförs eller tas ut [4]. Detta illustreras i figur 2.2.

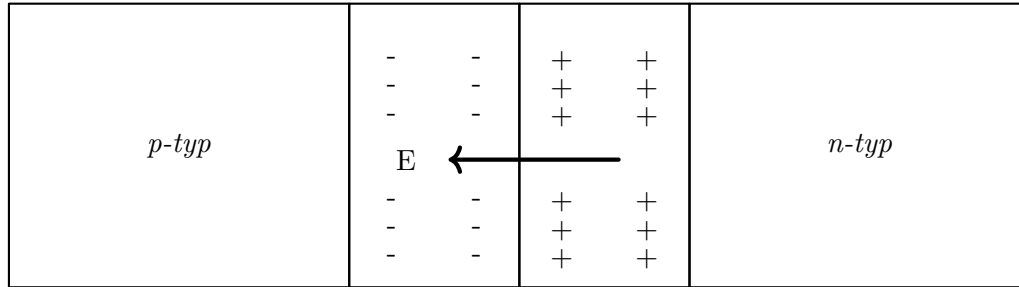


Figur 2.2: En elektron som träffas av en foton med energi $h\nu > E_G$ förflyttas från valensbandet till ledningsbandet, där h är Plancks konstant och v är fotonens hastighet.

När en elektron blir fritt rörlig skapas samtidigt ett så kallat hål, ett utrymme där en elektron annars hade varit, vilket illustreras i figur 2.2. Elektronerna och hålen blir i detta stadiet inte långlivade då de attraheras av varandra. Om nu ett elektriskt fält läggs på över Kiset kommer elektronen och hålet att föras åt varsitt håll och en ström skapas. [5, 4].

För att undgå att använda en yttre energikälla för att skapa en rörelse på elektron-hålpåren kan man istället blanda in föroreningar i Kiset, dopa det. Genom att tillföra ämnen som har mer eller mindre mängd atomer i sitt valensband förändras halvledarens ledningsförmåga. Om atomerna som används att dopa halvledaren har fler elektroner än Kisel har nu halvledaren en större mängd negativa laddningar och kallas därför "*n-typ*". Då det tillförs en atom som har färre elektroner än Kisel finns ett överflöd av positiva laddningsbärare och det dopade materialet kallas för "*p-typ*" [5]. Då man för samman ett material av *n-typ* med ett av *p-typ* skapas en så kallad *p-n övergång*. Direkt kommer elektronerna i *n*-delen att strömma över till hålen i *p*-delen av materialet, vilket också kallas att elektronerna diffunderar. Då elektronerna diffunderar efterlämnar de hål i *n*-delen och en så kallad diffusions-

ström uppstår. I takt med att elektronerna och hålen tas upp på var sida av p-n övergången uppstår ett elektriskt fält. Detta fältet motverkar diffusionsströmmen och i termisk jämvikt blir denna nästan obefintlig. I området runt p-n övergången uppstår en region där hål och elektroner inte existerar, detta område kallas ofta för *utarmningsområdet*. Områdena på var sida om utarmningsområdet är praktiskt taget neutral och kallas därför för de *quasineutral* områdena [6]. Se figur 2.3.



Figur 2.3: En typisk p-n övergång där elektroner och hål diffunderat till vardera sida. I mitten uppstår det elektriska fältet.

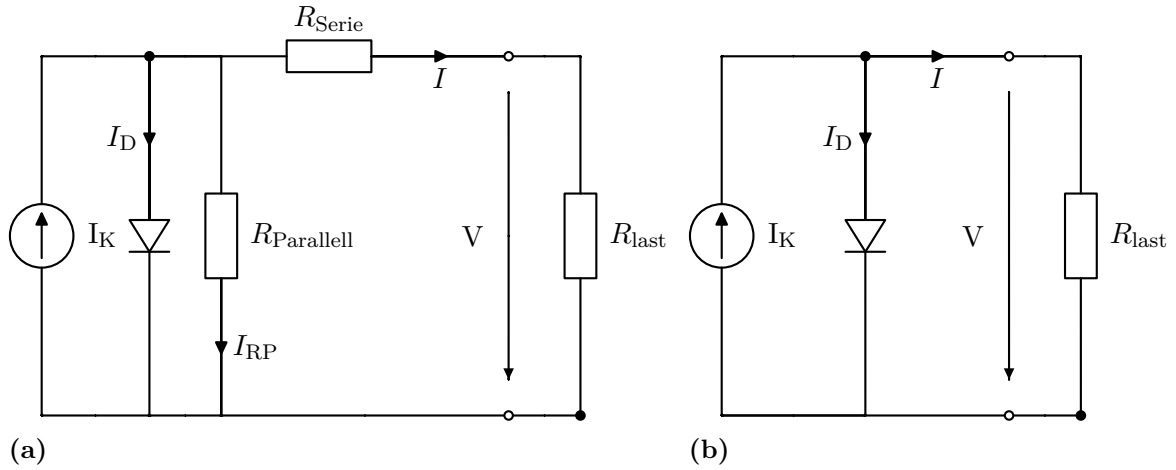
Nu kan solcellen absorbera fotoner med energi högre än bandgapet, vilket visas i figur 2.2, och med hjälp av det interna elektriska fältet dela på skapade elektron-hålpär. Elektronerna som skapas blir utsatta för en kraft som är motriktad det interna elektriska fältet och samlas i det quasineutrala området på *n*-sidan samtidigt som hålen påverkas av en kraft sammriktad med det elektriska fältet och samlas i *p*-området. Med varje elektron och hål som delas och samlas i respektive område kommer det elektriska fältet som utgör utarmningsområdet att försvagas. När det har försvagats till den punkt då det inte längre kan separera på elektron-hål par har solcellen uppnått sin öppnakretsspänning (V_O). Skulle cellen istället kortslutas skulle de ackumulerade laddningarna i *p* respektive *n* sidan direkt börja flyta mellan polerna. Den maximala kortslutningsströmmen (I_K) som kan flyta är direkt beroende på energin i det infallande solljuset,

$$I_K \propto G \quad (2.1)$$

där G är solljusets intensitet [4].

2.1.1.1 Ekvivalent kretsschema av en solcell

En solcell kan beskrivas av de två kretsarna i figur 2.4. När cellen blir belyst flyter en ström som kan antas vara proportionell mot G , enligt sambandet (2.1). Strömmen flyter från *n*-sidan till *p*-sidan.



Figur 2.4: Ekvivalenta scheman för en solcell. Där (a) är en mer detaljerad beskrivning av en solcell och (b) är en förenklad beskrivning.

Som visas i dessa figurer kan en solcell beskrivas som en konstant strömkälla, I_K , vilket är strömmen som uppstår av solljuset enligt sambandet (2.1). Parallellt med strömkällan sitter en diod som representerar strömmen genom cellens p - n övergång. För att få en mer detaljerad beskrivning av solcellen kan en parallell och seriell resistans läggas till innan en eventuell last, vilket kan ses i figur 2.4a. Strömmen I_D genom dioden kan beskrivas på nedanstående vis.

$$I_D = I_S * \left(\exp^{(eV/nkT)} - 1 \right) = I_S * \left(\exp^{V/\beta} - 1 \right) \quad (2.2)$$

Där V är spänning över p - n övergången, e är elementarladdningen, k är Boltzmann's konstant, T är temperaturen kring solcellen i Kelvin, n är solcellens kvalitetsfaktor och I_S är mättnadsströmmen som uppstår på grund av rekombination av elektroner och hål i p - n övergången och kan inte ses i figur 2.4, β är spänningen över solcellen vid en viss temperatur [4, 6].

Om nu det förenklade kretsschemat i figur 2.4b analyseras framgår det att den uttagna strömmen, I , beskrivs på följande vis:

$$I = I_K - I_D = I_K - I_S * \left(\exp^{V/\beta} - 1 \right) \quad (2.3)$$

Vilket leder till att den uttagna spänningen, V , beskrivs enligt nedanstående ekvation:

$$V = \beta * \ln \left(1 + \frac{I_K - I}{I_S} \right) \quad (2.4)$$

Då V_0 beräknas görs antagandet att $I = 0$, då ingen ström kan tas ut ur cellen.

$$V_0 = \beta * \ln \left(1 + \frac{I_K}{I_S} \right) \approx \beta * \ln \left(\frac{I_K}{I_S} \right) \quad (2.5)$$

Det sista ledet i ovanstående gäller då $I_K \gg I_S$.

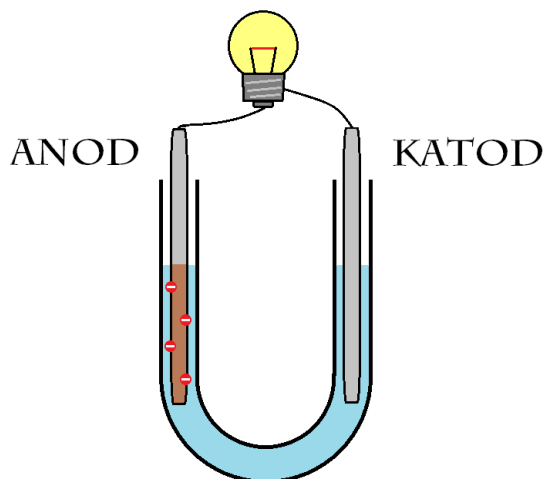
2.1.2 Organiska solceller

Organiska solceller skiljer sig från klassiska solceller i det avseende att de är, som i all biologisk kemi, uppbyggda av molekyler som består av kolatomer [3]. Dock följer dessa solceller samma fysikaliska lagar som diskuterades i avsnitt 2.1.1, vilket innebär att modellerna som diskuteras i avsnitt 2.1.1.1 kan antas vara goda nog för simuleringar av organiska solceller [3, p. 23].

2.2 Batterier

Batterier är ett samlingsnamn för galvaniska celler som är en konstruktion bestående av två elektronledande elektroder med benämningen, anod och katod. Elektroderna omges av en jonledande elektrolyt som skapar en kemisk reaktion vilket resulterar i att elektronerna vid katoden frigörs och färdas till anoden. Detta ger ett underskott respektive ett överskott av elektroner vid katoden och anoden och på så sätt uppstår en potentialskillnad mellan de båda [7, 8]. Vid sammankoppling av anoden och katoden kan en ström flyta, detta illustreras i figur 2.5.

Ett batteri består av en eller flera celler som ansluts seriellt eller parallellt till varandra. Vid en seriell anslutning ökar spänningen proportionellt mot antalet batterier, dock är strömmen genom batteriet densamma som strömmen genom en cell. Vid parallell anslutning ökar strömmen proportionellt mot antalet batterier men spänningen är densamma som vid en cell [7].



Figur 2.5: Elektronerna vandrar från katoden till anoden vilket ger upphov till en elektrisk ström.

2.2.1 Primära och sekundära batterier

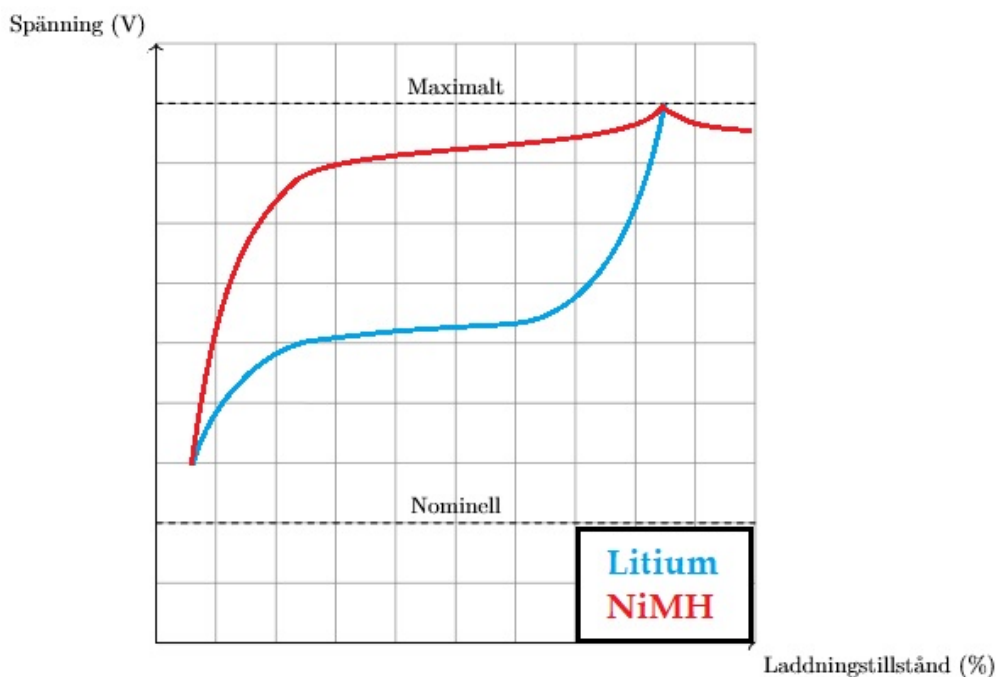
Batterier delas i huvudsak upp i två kategorier, primära och sekundära. Primära batterier (engångsbatterier) är konstruerade för att användas en gång och sekundära batterier (återuppladdningsbara) för att användas flera gånger. Skillnaden mellan primär- och sekundärbatterier är framförallt att då en omvänd spänning appliceras över ett sekundär batteri återställs den kemiska strukturen i anoden och katoden [7]. Batterier konstrueras av olika material för att uppnå olika egenskaper, de material som används i anod och katod bestämmer framförallt ett batteris egenskaper.

Det finns en rad olika typer så som alkaliska, blyackumulatorer, nickel metallhydridackumulatorer (NiMH) och litiumjonbatterier. Ett NiMH batteri har elektroder av metallhydrid och nickelhydroxid samt en elektrolyt av kaliumhydroxid. Ett litiumjonbatteri har elektroder av grafit och metallhydrid samt en elektrolyt av litiumsalt. Skillnaden mellan dessa batterier är att NiMH batterier har en låg inre resistans, låg självurladdning samt goda temperaturegenskaper medan litiumjonbatterier har hög effekttäthet per viktenhet men är känsliga för överhettning [7, 8].

2.2.2 Laddning

Batteriers egenskaper beror alltså på de material som används. Detta påverkar inte bara egenskaperna utan också hur de ska laddas. Återuppladdning av ett batteri bygger på att en yttre spänningskälla skiftar polariteten på anoden och katoden, detta omvänder den kemiska process som frigör elektroner från katoden. Den omvända processen medför att det istället flyter en ström från anod till katod. För att detta skall kunna inträffa måste spänningen som används vid laddning vara högre än batteriets då ström flyter från högre till lägre potential [7, 8].

Olika typer av batterier kräver olika typer av laddning vilket kan härledas till deras kemiska sammansättning. Det finns två grundläggande återladdnings principer, konstant spänningsladdning och konstant strömladdning. Det finns även så kallade smartladdare som använder sig av en kombination av dessa grundprinciper. En konstant spänningsladdare håller en konstant spänning över batteriet och låter strömmen variera i takt med att batteriets spänning ökar. En konstant strömladdare håller istället en konstant ström till batteriet genom att reglera spänningen över det [7]. Vid laddning av litiumjonbatterier skall en kombination av konstant ström och spänning användas. NiMH batterier skall istället laddas med en konstant ström. Storleken av denna ström avgör hur snabbt batteriet laddas, om strömmen är 5 % av batteriets kapacitet tar det ca 18 – 20 timmar. Är strömmen istället 50 % av batteriets kapacitet tar laddningen ca 3 – 4 timmar och är strömmen 100 – 150 % av kapaciteten tar laddningen typiskt 1 – 2 två timmar [9, 10]. Karakteristiken för normal laddning av litiumjon- och NiMH-batterier visas i figur 2.6 [11].



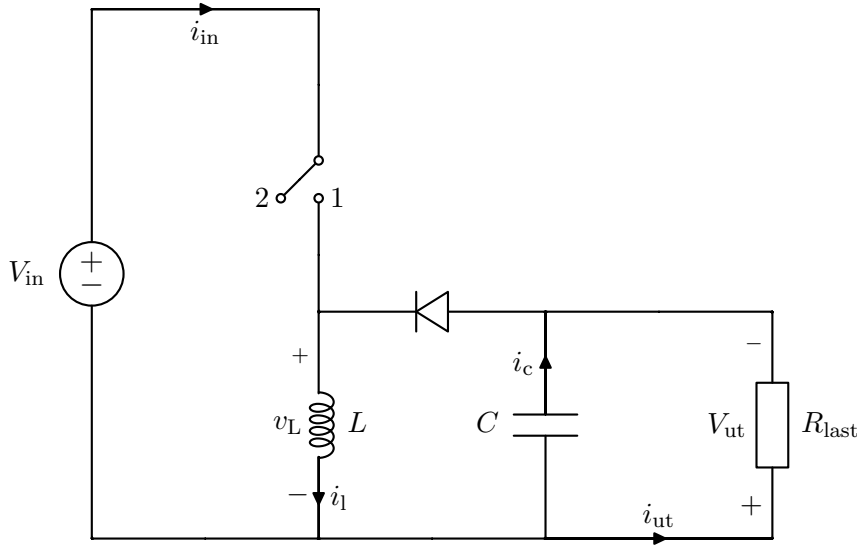
Figur 2.6: *Typiskt Laddningskarakteristik för NiMH- och Litium-batterier*

2.3 Laddningsregulator

För att övervaka och reglera ett batteris laddning behövdes en laddningsregulator. En laddningsregulator kan återuppladda, övervaka samt underhållsladda ett batteri [12]. En mikrokontroller fyller en sådan funktion då den bland annat kan mäta och tillföra analoga signaler.

2.4 DC-DC omvandlare

En mikrokontroller kräver en stabil matningsspänning, det kan inte solcellerna förse den med. För att stabilisera matningsspänningen användes en DC-DC omvandlare. DC-DC omvandlare är aktiva kretsar som bland annat används vid applikationer med likströmsmotorer, vilka huvudsakligen matas av en varierande spänning. DC-DC omvandlaren omvandlar den varierande spänningen till en konstant spänning. Tre vanligt förekommande omvandlare är buck-, boost- samt buck-boost omvandlare. Skillnaden mellan dem är att buck transformerar ned spänning och boost upp. Buck-boost är en kombination av de båda. Typiskt brukar en buck-boost-omvandlare konstrueras som i figur 2.7 [13].



Figur 2.7: En typisk buck-boost omvandlare.

Omvandlaren består av en switch, spole, diod och kondensator samt en eventuell last. När switchen är i tillkopplat läge, läge 1 i figur 2.7, tillförs energi till spolen samtidigt som dioden blockerar ström att gå till lasten. När switchen är i läge 2 kommer spolen att laddas ur och energi tillförs till lasten [13]. För att analysera buck-boost omvandlaren i figur 2.7 integreras först spänningen över spolen, L enligt ekvation (2.6).

$$\int_0^{T_s} v_L dt = 0 \implies$$

$$V_{in} * D * T_s + (-V_{ut}) * (1 - D)T_s = 0$$

$$\implies \frac{V_{ut}}{V_{in}} = \frac{D}{1 - D} \quad (2.6)$$

Där D är switchens duty cycle och T_s är dess period tid. Om dessutom antagandet $P_{in} = P_{ut}$ görs ges

$$\frac{I_{ut}}{I_{in}} = \frac{1 - D}{D}. \quad (2.7)$$

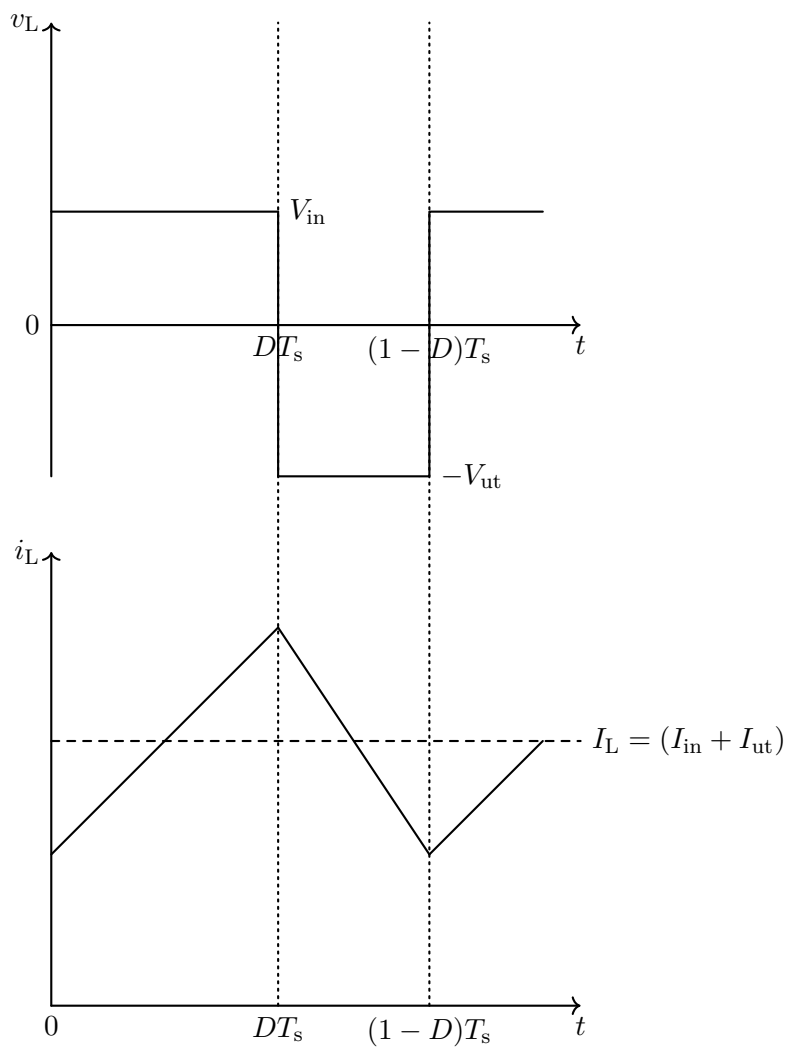
För strömmen gäller det att I_L , vilket är medelvärdesströmmen som visas i figur 2.8, är större än variationerna i tiden. Detta beskrivs i (2.8).

$$I_L \geq \frac{1}{2} * i_{L, \text{topp}} = \frac{V_{in}}{2 * f * L} * D \quad (2.8)$$

där f är switchens frekvens i Hz , L är spolens storlek i H och $\frac{1}{2} * i_{L, \text{topp}}$ är strömmens nivå vid tiden $D * T_s$. Till sist går det med hjälp av Kirchhoffs strömlag utläsa att strömmarna i figur 2.7 har följande förhållande [13].

$$I_{ut} = I_L - I_{in} \quad (2.9)$$

Från ekvationerna (2.6) och (2.8) kan graferna i figur 2.8 skisseras. Från dessa går det, som i ekvation 2.8, att avgöra om spolen är stor nog att driva ström till lasten.



Figur 2.8: Överst: Spolens momentatna spänning. Under: Spolens momentana ström.

3

Metod

Genom att samla information om solceller, batterier och laddning av batterier har arbetet planerats och utförts. Informationssökning samt undersökning av olika solceller och deras kapacitet låg till grund för konstruktionen av kapseln som batteriet och den reglerande laddkretsen placeras i. Solcellerna undersöktes genom att deras V_O och I_K uppmättes vid olika sammankopplingar. Dessa mätningar gjordes vid fyra olika tillfällen, alla var dagar med goda förhållanden. Resultaten av dessa mätningar jämfördes sedan mot solcellernas datablad för att göra en uppskattning av deras spänningar och strömmar vid belastning. En kapsel av samma storlek som ett AA-batteri konstrueras där solceller, batteri och en laddkrets ska rymmas.

Genom att studera litteratur om batterier valdes en typ av batterier som passar tillämpningen. Från detta batteri konstruerades och anpassades en krets som laddar och reglerar batteriet. Dess mått bestäms av utrymmet inuti kapseln. En prototyp byggdes för att testa kretsens funktioner samt mikrokontrollerns laddningsalgoritm. Vid önskvärd funktionalitet producerades kretskort och en prototyp för hela laddaren monterades samman.

4

Material

I detta kapitel listas de material som använts under projektets gång.

- Kopplingsplatta
- Kopplingstråd
- Batteri ANSMANN AAA-550mAh low self discharge
- Batteri Varta V 15 H 15 mAh 1.2 V
- Solcell Infinity PV Postcard solar cell
- Solcell IXYS IXOLAR SolarBIT KXOB22-12X1F
- Transistor BC547B
- Resistor 12 Ω
- Resistor 15 Ω
- Resistor 560 k Ω
- Resistor 2200 k Ω
- Resistor 10 k Ω
- Resistor 1500 Ω
- Kondensator 47 pF
- Kondensator 0.1 μ F
- Kondensator 4.7 μ F
- Kondensator 220 p μ F
- Spole 1.5 μ H
- Mikrokontroller PIC16LF1705 -I/ST
- DC/DC-omvandlare TPS63030DSKT
- PICkit3 debugger
- Multimeter
- Oscilloskop RIGOL DS1102E

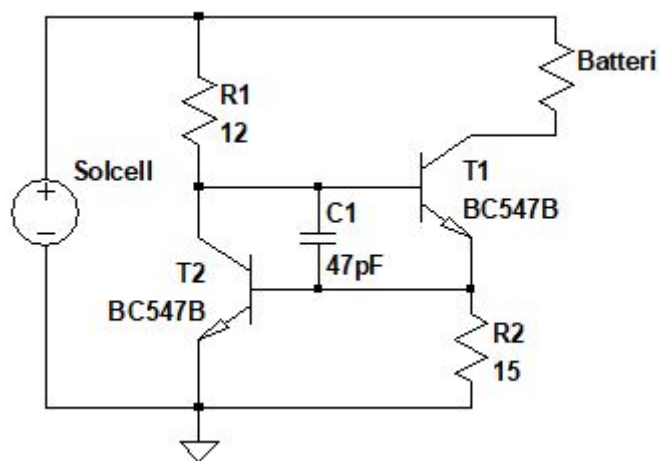
5

Analog konstruktion

NiMH batterier har låg självurladdning och lämpar sig därför väl för applikationen. Ett sådant batteri ska som nämnts i avsnitt 2.2.2 laddas av en konstant ström vilket kretsen i figur 5.1 skapar. Kraftkällan till kretsen är flexibla organiska solceller som ska lindas runt kapseln. Solcellen mäts vid olika tillfällen för att undersöka om dess kapacitet var tillräcklig att använda som kraftkälla. Det som då mättes var solcellens öppnakretsspänning (V_O) och kortslutningsström (I_K).

5.1 Krets och simulering

Den konstruerade kretsen visas i figur 5.1. Transistorerna i kretsen utgör en negativ återkoppling som reglerar strömmen till batteriet. Om det antas att transistorerna arbetar i sina aktiva områden har basen på transistorn, T2, en spänning på ca 0.7 V och transistorn, T1, en spänning på ca 1.4 V. Om basströmmen i T2 försummas går majoriteten av strömmen genom emittern och kollektorn på T1. Därmed går strömmen som går genom R_2 och T1 också genom batteriet [14].



Figur 5.1: Den analoga krets som ska ladda batteriet [14].

Mätningar i LT Spice visade att vid spänningar över 0.5 V började ström att flyta till batteriet. Teoretiskt skulle solcellerna ge spänning nog för att ladda batteriet men då de kopplades samman för uppmätning visade det sig att det inte fungerade. Spänningen från solcellerna sjönk kraftigt då de belastades och ingen energi tillfördes till batteriet.

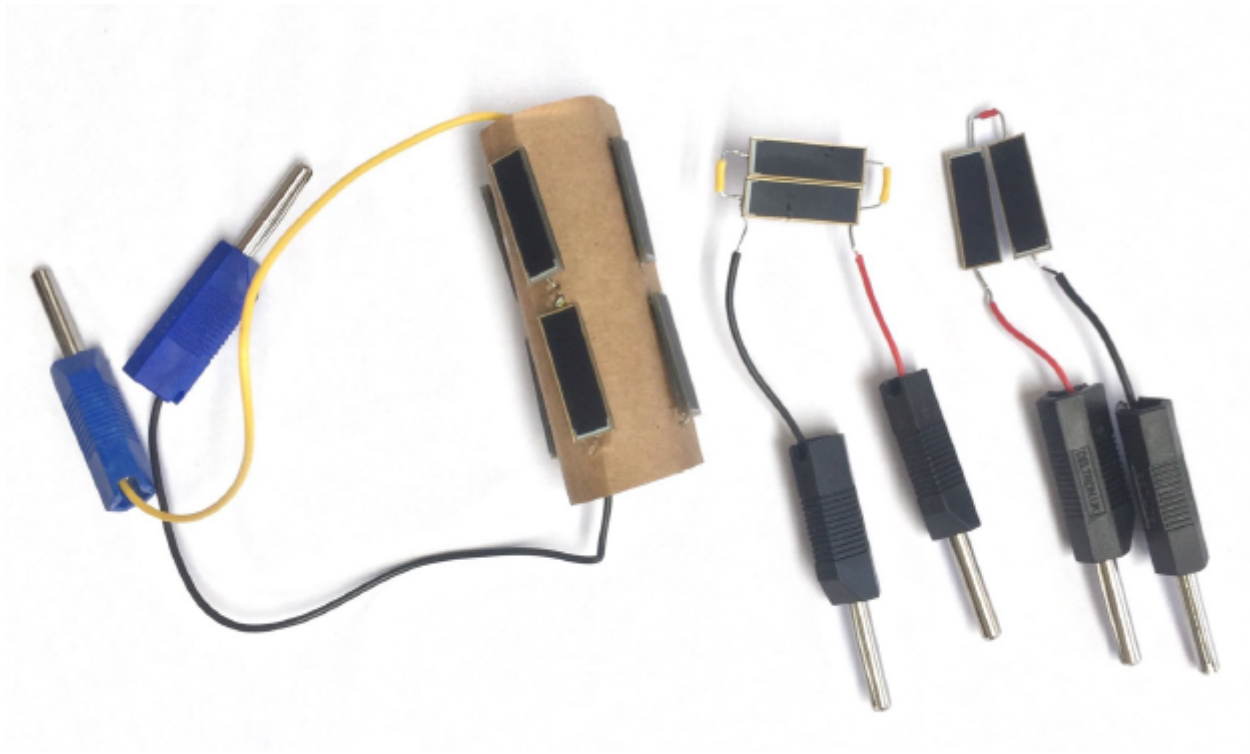
6

Digital konstruktion

Då solcellerna från Infinity PV inte gav tillräckligt med energi för att driva kretsen och eftersom en laddningsregulator enligt vår vetskap inte fanns användes istället monokristallina solceller från IXYS, dessa har enligt [15] en verkningsgrad på ca 22 % jämfört med 2 – 7 % verkningsgrad på cellen från Infinity PV.

6.1 Val av solceller

Utöver en hög verkningsgrad har också solcellerna goda ström- och spänningsvärden då de belastas [15]. Cellerna är små och åtta stycken får plats runt kapseln till laddningsanordningen. Detta möjliggör att sammankoppla solcellerna så att spänning och ström optimeras. För att avgöra vilken sammankoppling som passade bäst utfördes mätningar med två celler i serie, två parallella celler, åtta celler i serie cirkulärt monterade samt fyra celler i serie parallellt med fyra celler i serie även dessa cirkulärt monterade. Mätningssuppsättningen visas i figur 6.1.



Figur 6.1: Bild över de olika uppsättningarna som mätningar utfördes på. FV, cirkulär montering av 8 celler, parallellkoppling av två celler och serie koppling av två celler.

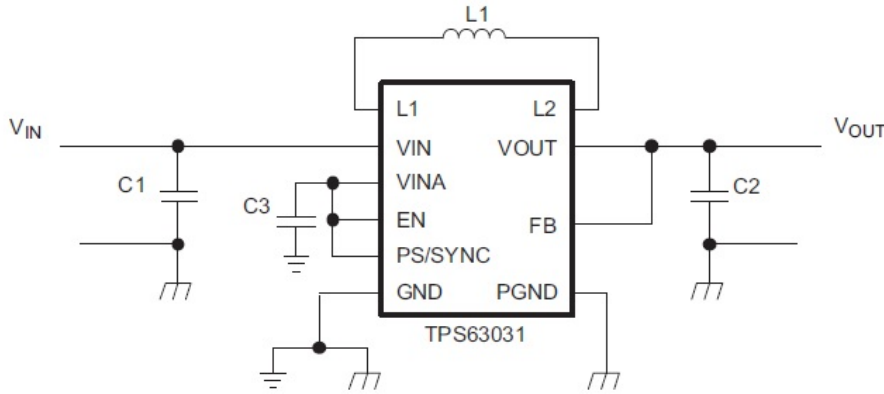
Mätningar med åtta solceller i serie upprepades då solcellerna monterats i laddningsanordningens kapsel. Resultaten av mätningarna visas i avsnitt 7.2.1 i tabellerna 7.2 och 7.3.

6.2 Konstruktion av laddkrets

Energien från solcellerna är direkt beroende av solljuset, enligt (2.1). Detta måste beaktas vid konstruktionen av den krets som ska ladda batteriet. För att stabilisera spänningen från solcellerna användes en buck-boost omvandlare i serie med solcellerna. I figur 6.2 visas den designade kretsen.

6.2.1 Buck-Boost TSP63030

Omvandlaren som används i laddningsanordningen var en buck-boost från Texas Instruments. För att få den att ge önskad spänning behövdes vissa kringliggande komponenter väljas enligt omvandlarens datablad. Komponenterna som skulle bestämmas var R_1 , R_2 , C_1 , C_2 , C_3 och L_1 . Kopplingarna av kondensatorerna, spolen och benen visas i figur 6.3 nedan [16].



Figur 6.3: Rekommenderad koppling av DC-DC omvandlaren [16].

Spolen L_1 är densamma som beräknades i avsnitt 2.4. För att ställa in önskad utspänning skulle en spänningsdelning mellan resistorerna R_1 och R_2 utföras. Dessa syns inte i figur 6.3, men visas tydligt i figur 6.2. Spänningsdelningen ska vara placerad mellan V_{OUT} , GND och FB vilka kan ses i figur 6.3. Till FB , som är en feedback port, kopplades mittpunkten av spänningsdelningen [16]. Resistorerna valdes enligt följande

$$R_1 = R_2 * \left(\frac{V_{OUT}}{V_{FB}} - 1 \right) \quad (6.1)$$

där det rekommenderade värdet på $R_2 \leq 500 \text{ k}\Omega$ samt att spänningen V_{FB} typiskt är ca 500 mV när omvandlaren är korrekt reglerad [16].

Det rekommenderas att använda en glättningskondensator till matninsspänningen på $4.7\mu F$ [16]. Kondensatorn vid utgången rekommenderas vara minst ca $10\mu F$ men en större innebär mindre spänningsrippel på utgången [13]. Spolens storlek valdes genom att använda teorin i avsnitt 2.4 för att simulera $i_{L,topp}$ och I_L . Enligt [16] beskrivs $i_{L,topp}$ enligt

$$i_{L,topp} = \frac{I_{UT}}{\eta * (1 - D)} + \frac{V_{IN} * D}{2 * f * L}, \quad (6.2)$$

där η är den uppskattade verkningsgraden, vilken finns beskriven i [16]. Simuleringen för $I_{L,topp}$ utfördes genom att låta strömmen vara beroende av spolens storlek och simuleringen för I_L genom att ekvationerna 2.7 och 2.9 användes, samt låta strömmen vara beroende av strömmen som solcellerna bidrog med.

6.2.2 Övriga komponenter

Matningsspänningen anslöts via en resistans, R_5 , till ingången $\overline{MCLR}$ som är en aktivt låg ingång. $\overline{MCLR}$ kräver en låg spänning, då en hög spänning försatte mikrokontrollern i omstartsläge. Till batteriets pluspol anslöts en utgång, R_{A0} , samt en ingång, R_{C1} , från mikroprocessorn. Ingången R_{C1} fick till uppgift att övervaka det inkopplade batteriets laddning medan R_{A0} ska förse batteriet med en konstant laddström, denna metod beskrivs i 2.2.2.

Från kretsschemat i figur 6.2 designades ett kretskort som skulle passa i innandömet av laddningsanordningens kapsel. Då kretskortet blev litet behövde komponenterna placeras på både ovan- och undersidan av kortet.

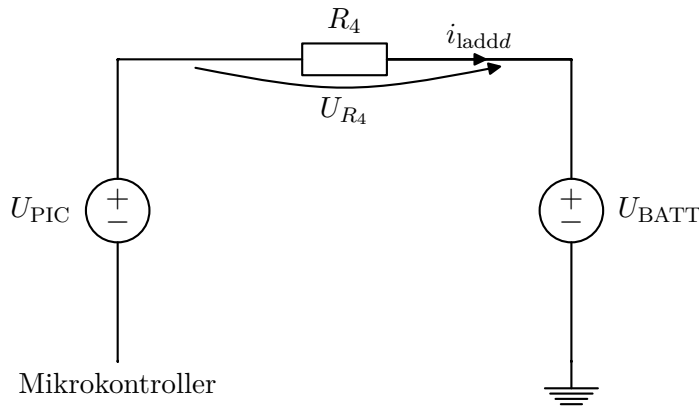
6.3 Laddningsalgoritm

Programmets kod skrevs i programmeringsspråket C och det sköter övervakningen av batteriets spänningsnivå och laddningen av batteriet. Övervakningen sker genom att mäta batteriets pluspol och AD-omvandla det analoga värdet. AD omvandlingen gjordes enligt formel 6.3 och värdet evalueras av mikrokontrollern. Om värdet överstiger 40% av batterispänningen väntar programmet i 20 minuter innan en ny mätning utförs, i annat fall påbörjas laddningen. AD omvandlingen beräknas av

$$D_{\text{BATT}} = \frac{A_{\text{BATT}}}{V_{\text{DD}}} * 2^n, \quad (6.3)$$

där n är antalet bitar i registret.

Då batteriet som användes var ett NiMH batteri skulle laddningsmetoden enligt avsnitt 2.2.2 vara en konstant strömladdning. Detta uppnåddes genom att mäta batteriets pluspol och tillföra laddning så att potentialskillnaden över resistansen R_4 i figur 6.4 förblev konstant [17]. Detta var nödvändigt eftersom batteriets spänning förändrades i takt med att det återladdades och därför måste också utspänningen från mikrokontrollern förändras. Då R_4 var 750Ω och batteriet skulle laddas med en ström på 1.5 mA skulle enligt Ohms lag spänningsfallet över R_4 , V_{R_4} , vara 1.125 V. Vilken spänning mikrokontrollern skulle mata ut härleddes från figur 6.4.



Figur 6.4: Figuren visar tanken som ligger till grund för mikrokontrollerns evaluering av spänningen U_{PIC} .

Från 6.4 härleds (6.4).

$$i_{ladd} = \frac{U_{PIC} - U_{BATT}}{R_4} \implies U_{PIC} = U_{R_4} + U_{BATT} \quad (6.4)$$

Denna spänning skulle mikrokontrollern lägga ut. För att åstadkomma en spänningsnivå från mikrokontrollern som inte var densamma som matningsspänningen utfördes en pulsbreddsmodulation (PWM). När batteriet nästan var fulladdat behövde mikrokontrollern lägga ut högst spänning. I detta läget behövdes ingen PWM utföras. NiMH-batteriet bör laddas när det nått en nivå av 0.8 V. Det visade sig att en PWM-signal som var 80 % av full spänning passade vid denna nivå.

Utöver laddningen av batteriet skulle mikrokontrollern bevaka sin värme. Detta utfördes enligt [18] genom att mikrokontrollerns inbyggda temperaturindikator genererar ett analogt värde som AD omvandlades.

Temperaturen kunde estimeras med (6.5), (6.6) samt (6.7) och programmet avbryter laddningen då temperaturen överstigit 60 ° C. Laddningen återupptas när temperaturen sjunkit under 20 ° C

$$V_t = 0.659 - (\text{Temperatur i } ^\circ\text{C} + 40) * 0.00132 \quad (6.5)$$

$$V_{temp} = V_{DD} - 2V_t \quad (6.6)$$

$$AD_{resultat} = \frac{V_{temp}}{V_{DD}} * (2^n - 1) \quad (6.7)$$

Laddningsalgoritmens källkod visas i sin helhet i A.1.

7

Resultat

7.1 Analog

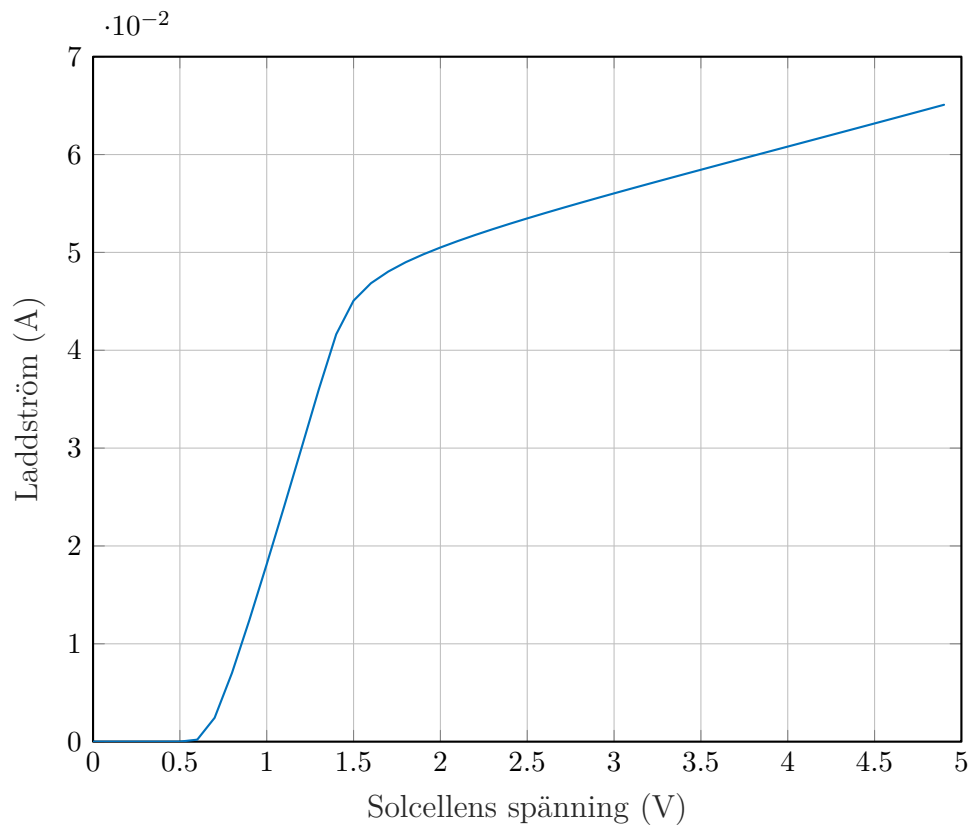
Mätningarna utfördes i soligt och klart väder under april månad.

Tabell 7.1: *Mätning av $V_{\text{Ö}}$ och I_{K} för infinity PV's solcell, samt två stycken solceller i serie respektive parallellt från IXYS.*

Tid	Solcell	$V_{\text{Ö}}$ (V)	I_{K} (mA)
13:45	IXYS Parallell	0.66	68.0
13:50	IXYS Serie	1.36	41.2
13:52	PV Infinity	5.65	35.6
9:30	IXYS Parallell	0.66	50.8
9:32	IXYS Serie	1.37	37.6
9:35	PV Infiniy	5.85	57.8

PV Infinity's solceller gav högst spänning och ström. IXUS solceller gav mest ström som parallellkopplade och mest spänning seriekopplade.

Simuleringsresultatet från kretsen i avsnitt 5.1 visade att kretsen gav en relativt konstant utström förutsatt att matningsspänningen överskred 1.6V vilket kan ses i figur 7.1.



Figur 7.1: Ström/spänningskarakteristik för den simulerade kretsen i 5.1.

7.2 Digital

7.2.1 Uppmätning av solceller

I avsnitt 6.1 beskrivs hur en första uppmätning av solcellen från IXYS utfördes. I figur 6.1 visas till vänster hur de monterades. Resultaten av dessa uppmätningar visas i tabell 7.2.

Tabell 7.2: Mätning av $V_{\text{Ö}}$ och I_{K} för 8 stycken seriekopplade solceller, respektive 4 stycken seriekopplade parallellt med 4 stycken seriekopplade solceller från IXYS.

	$V_{\text{Ö}}$ (V)	I_{K} (mA)
8st i serie	4.4	2.2
4st//4st	2.2	5.0

Samma mätning utfördes i den färdiga kapseln. Detta resultat visas i tabell 7.3.

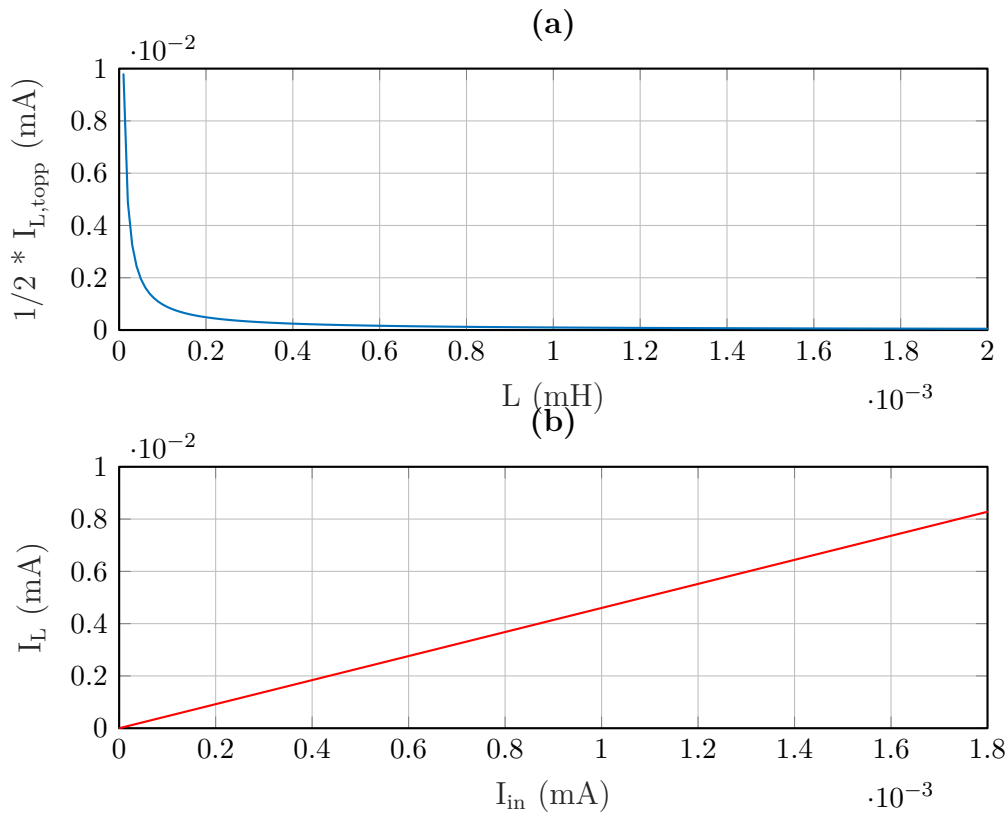
Tabell 7.3: Uppmätt $V_{\text{Ö}}$ och I_{K} från den första cirkulära prototypen.

	$V_{\text{Ö}}$ (V)	I_{K} (mA)
8 stycken i serie	4.9	6.0

Det visar sig att åtta solceller i serie ger en högre spänning än fyra solceller i serie parallellt med fyra solceller i serie. Det går också att se att resultaten från mätningarna skiljer sig åt från den första cirkulära mätanordningen i figur 6.1 till den färdiga kapseln.

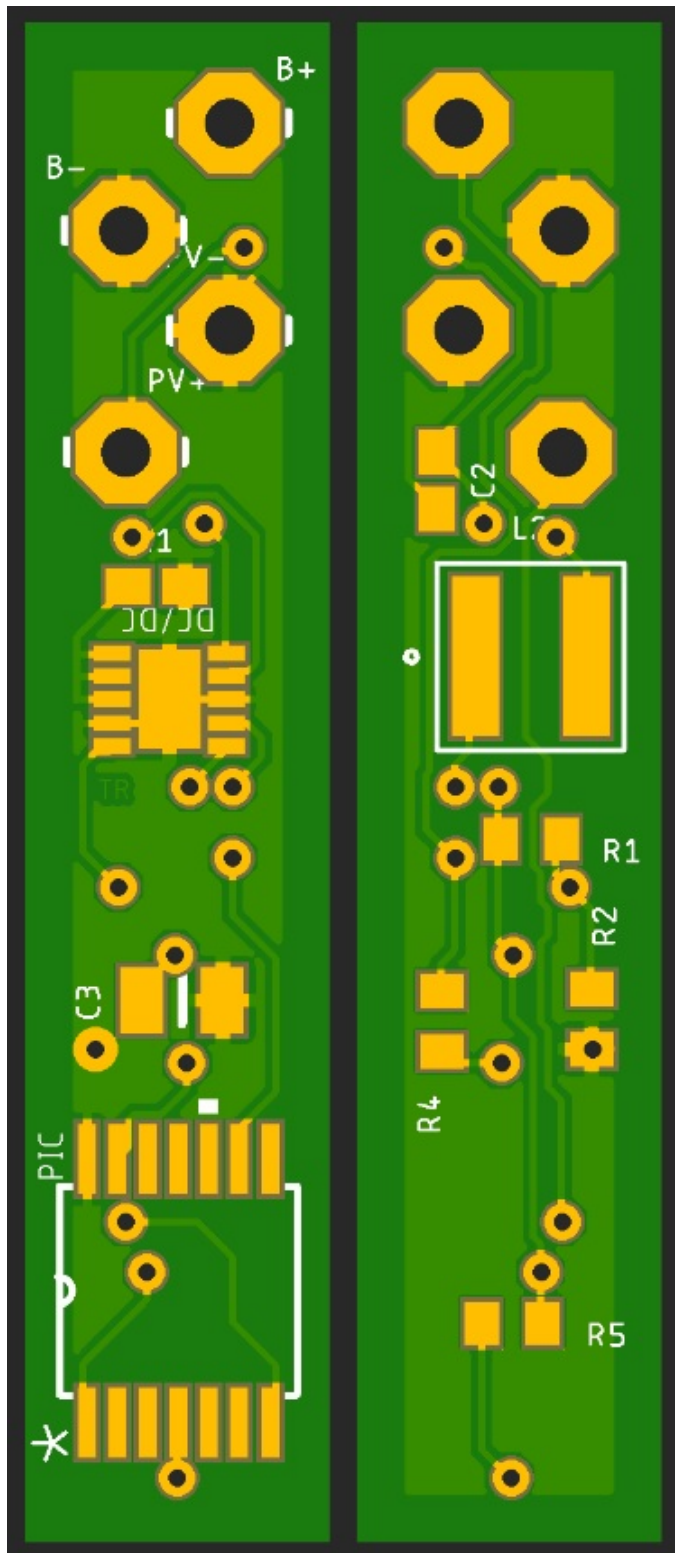
7.2.2 Kretsens konstruktion

Nedan presenteras de resultat av beräkningar som gjordes i avsnitt 6.2 och det färdiga kretskortet.



Figur 7.2: Graf (a) visar $\frac{1}{2} \cdot i_{L,topp}$ som funktion av spolens storlek i mH. Graf (b) visar I_L som funktion av den inkommande strömmen från solcellerna i mA.

Som grafen för $\frac{1}{2} \cdot i_{L,topp}$ visar, avtar den då spolens storlek ökar och I_L ökar linjärt med den inkommande strömmens magnitud. Det färdiga kretskortet visas i figur 7.3.



Figur 7.3: Till vänster: kretskortets ovan sida. Till höger: kretskortets undersida.

Figur 7.3 visar mikrokontrollern, vilken är den mest platskonsumerande komponenten, samt spolen och buck-boost omvandlaren. Vilka syns längst ned på kretskortets ovansida respektive i mitten på kretskortets baksida.

8

Diskussion

Det fanns förhoppningar att den tunna och flexibla organiska solcellen från InfinityPV skulle kunna driva laddkretsen. Uppmätningarna i avsnitt 7.1 gav stöd för denna förhoppningen men när solcellen belastades med kretsen i figur 5.1 i avsnitt 5.1 gick all energi förlorad. Detta var något vi anade kunde hända då InfinityPV inte specificerar sina solcellers verkningsgrad utan lovar kunder att den kommer vara mellan 2 – 7 %. Det kan tänkas att den solcellen som användes var av den lägre verkningsgraden.

De kristallina solcellerna från IXYS som sedan användes i den färdiga prototypen hade en mycket högre verkningsgrad, 22%, och kunde därför förse laddkretsen med tillräcklig energi. Dessa var istället mycket större än den flexibla solcellen vilket påverkade den invändiga storleken i laddningsanordningens kapsling. Återigen begränsades prototypen av solcellerna, som å ena sidan hade för dålig verkningsgrad eller var större än önskat. Resultatet av det mindre utrymmet inuti kapslingen innebär att batteriet som först hade förväntats att placeras där inte längre fick plats. Detta byttes ut mot ett mycket mindre batteri vars kapacitet var långt under önskad nivå.

Det kan spekuleras i att de organiska solceller som finns på marknaden ännu inte är tillräckligt effektiva och att tekniken behöver tid för att utvecklas. Mer effektiva organiska solceller innebär att innandömmet av laddningsanordningens kapsel kan utvidgas och ett större batteri kan få plats. Dock skulle ett större batteri i sin tur leda till mindre plats för kretskortet för laddkretsen. För att maximera utnyttjandet av utrymmet inuti kapseln skulle man kunna specialbygga ett batteri som tillåter att kretskortet får plats utan några större förändringar. Samtidigt skulle ett sådant batteri förhoppningsvis vara av en större kapacitet än det knappcells-batteri som används idag.

Programmeringen av mikrokontrollern var kantad av motgångar där mycket tid användes till felsökning. Det var först i projektets slutskede som en laddningsalgoritm kunde framställas och testas ihop med kretsen. Med mer tid hade en mer gedigen och systematisk testning av kretsen kunnat göras.

9

Slutsats

För att avslutningsvis ge ett svar till frågeställningarna i avsnitt 1.4 kan man säga följande. Av de solceller som undersöks i 6.1 visar det sig att organiska flexibla solceller inte ger tillräckligt med energi, istället används de monokristallina solcellerna (frågeställning 1 och 2). Tillsammans med buck-boost-omvandlaren från avsnitt 6.2.1, går det att konstruera en prototyp av ett solcellsladdat batteri (frågeställning 3 och 8). Detta kan med hjälp av kretskortet och laddningsalgoritmen, vars konstruktioner presenteras i avsnitt 6.2 och 6.3, återuppladdas i solen (frågeställning 5, 6 och 7). Frågeställning 4 kunde av tidsskäl desvärre inte besvaras.

I avsnitt 8 nämner vi att det finns utrymme för förbättring både av kretskortet och laddningsalgoritmen. Organiska solceller är också något med stor utvecklingspotensial som hade varit fördelaktigt för prototypen då dessa tar mindre plats än de kristallina cellerna. Den ökade volymen hade gett möjligheten att använda ett större batteri med mer kapacitet, och på så sätt öka användningsområdena. Vi tror oavsett att det med tiden kommer utvecklas batterier som inte är helt olika vår prototyp och att dessa kommer att konkurrera ut dagens uppladningsbara batterier.

Referenser

- [1] The Battery Challenge, “Beräkning av minskat batteriavfall,” 2014.
- [2] W. R. Fahrner, “Amorphous silicon / crystalline silicon heterojunction solar cells,” *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*, pp. 1–97, 2013.
- [3] W. Tress, *Organic Solar Cells*. Springer, 2014, vol. 208.
- [4] H. Habberlein, *Photovoltaic system Design and practice*. Wiley, 2012.
- [5] M. Andersson and J. Hedström, *Solceller, Från solljus till elektricitet*. AB Svensk Byggtjänst, 2002.
- [6] A. Luque, “The Physics of the Solar Cell,” in *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. John Wiley & Sons, 2003.
- [7] J. Erjavec, *Hybrid, Electric & Fuel-Cell Vehicles*. CENGAGE Learning, 2007.
- [8] S. Anderson, A. Sonesson, O. Svahn, and A. Tullberg, *Gymnasie Kemi 1*, 4th ed. Liber, 2012.
- [9] T. Mundra and A. Kumar, “An Innovative Battery Charger for Safe Charging of NiMH/NiCd Batteries,” *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 53, no. 3, pp. 1044–1052, aug 2007.
- [10] N. Kularatna, *Power electronics design handbook : low-power components and applications*. Newnes, 1998.
- [11] MATLAB, “Implement generic battery model - Simulink - MathWorks Nordic.”
- [12] Benchmarq Products from Texas Instruments, “NiCd/NiMH Fast-Charge Management ICs,” 2009.
- [13] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *POWER ELECTRONICS Converters, Applications, and Design*, 3rd ed. JOHN WILEY & SONS, INC., 2003.
- [14] P. Magnusson, “Utveckling av en enkel batteriladdare,” 2016.
- [15] IXYS, “IXOLAR High Efficiency SolarBIT,” pp. 1–6, 2014.
- [16] Texas Instruments, “High Efficiency Single Inductor Buck-Boost Converter With 1-a Switches,” p. 24, 2009.
- [17] L. Bengtsson, *Elektriska Mätssystem och Mätmetoder*, 1st ed. Studentlitteratur AB, 2012.
- [18] J. Dillon, “Use and Calibration of the Internal Temperature Indicator,” 20130820.

A

Appendix 1

A.1 Laddningsalgoritimens källkod

```
void main(void)
{
    // initialize the device
    SYSTEM_Initialize();
    void ADC_Initialize(void);
    void PWM3_Initialize(void);
    // When using interrupts, you need to set the Global and Peripheral Interrupt Enable bits
    // Use the following macros to:

    // Enable the Global Interrupts
    //INTERRUPT_GlobalInterruptEnable();

    // Enable the Peripheral Interrupts
    //INTERRUPT_PeripheralInterruptEnable();

    // Disable the Global Interrupts
    //INTERRUPT_GlobalInterruptDisable();

    // Disable the Peripheral Interrupts
    //INTERRUPT_PeripheralInterruptDisable();

    while (1)
    {
        uint16_t dutycycle;
        int var;
        uint16_t convertedValue;
        bool ADC_IsConversionDone();

        void ADC_SelectChannel(adc_channel_t(channel_AN5));
        void ADC_StartConversion();
    }
}
```

```
convertedValue = ADC_GetConversionResult();

var = ADC_GetConversion(channel_AN5);

//Batteriet är fullt -> Sluta ladda
if(var>0x01A7){
    dutycycle == 0x0000;
    void PWM3_LoadDutyValue(uint16_t dutycycle);
}
//Ladda
if(var<0x01A7){
    dutycycle == var + 0x01F5;
    void PWM3_LoadDutyValue(uint16_t dutycycle);
}
}

/**
End of File
*/
```

Figur A.1: *Källkod för batteriladdningen*