



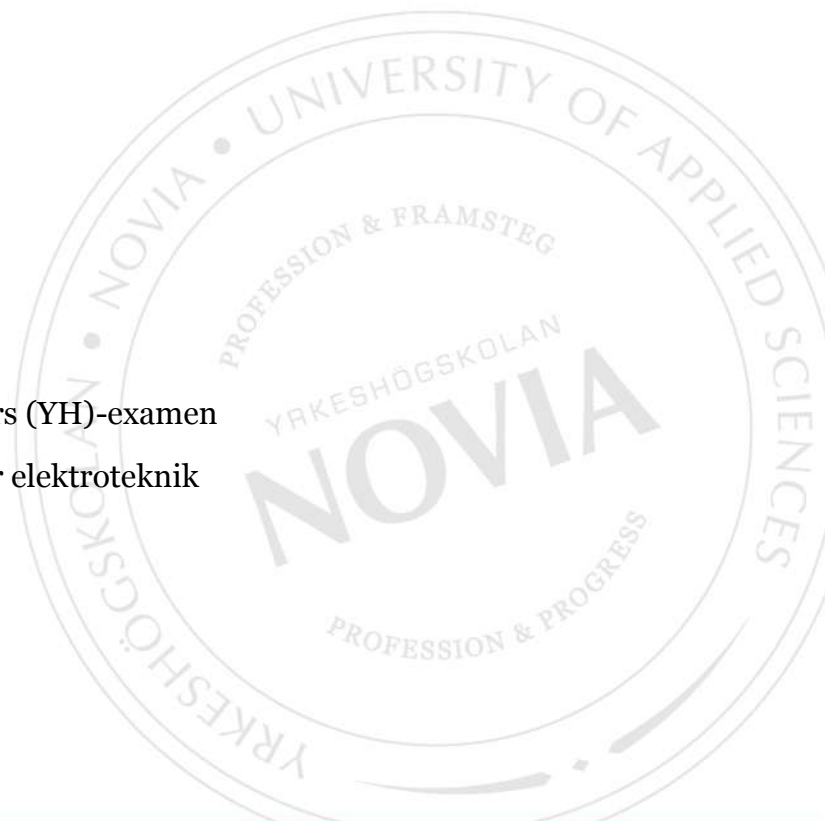
Självförsörjande sensorer

Simon Back

Examensarbete för ingenjör (YH)-examen

Utbildningsprogrammet för elektroteknik

Vasa 2014



EXAMENSARBETE

Författare: Simon Back

Utbildningsprogram och ort: Elektroteknik

Inriktningalternativ: Automationsteknik

Handledare: Matts Nickull

Titel: *Självförsörjande sensorer*

Datum: 1.3.2014 Sidantal: 33 Bilagor: 3

Abstrakt

Människans strävan att öka levnadsstandarden leder till en allt högre energikonsumtion. För att minska de ökande energikraven utvecklas nya tekniker som kräver mindre och mindre energi, men kvantiteten av prylar ökar och det finns gränser för hur energinåla de kan vara.

Detta arbete gjordes för att ta reda på hur effektiva de småskaliga förnyelsebara teknologier som finns tillgängliga idag är. Samt olika sätt att lagra energi och effektiv energihanteringsteknik. På funktionsnivå undersöktes tillgängliga energikällor för mindre applikationer. Samma gjordes för energilagringen och mellan olika mikrokretsar som tagits fram för effektiv hantering av energi. Slutligen gjordes en mätning med en solcell, en kondensator och ett energihanteringschip för att se hur chipet fungerar i praktiken samt hur effektivt det är. Slutresultatet är en förståelse för energikraven hos en applikation med WiFi och vad som krävs för att få en fungerande applikation samt en inblick i energitekniker och hur de fungerar.

Språk: svenska Nyckelord: trådlös sensor, förnyelsebar, energi

BACHELOR'S THESIS

Author: Simon Back
Degree Programme: Electrical engineering
Specialization: Automation engineering
Supervisor: Matts Nickull

Title: *Self-sustaining sensors*

Date: 1.3.2014 Number of pages: 33 Appendices: 3

Summary

Mankind's struggle to increase the standards of living leads to larger energy consumption. To decrease the increasing energy demands, new technologies are researched that are more and more energy efficient. However, the sheer quantity of equipment requiring energy increases and there are limits as to how energy efficient they can be.

This thesis was done to find out how effective small scale renewable energy sources today are, different ways to store energy and efficient energy management technology. The energy sources were looked upon on a functionality level, the same was done for energy storage devices and a comparison between them. The energy management chips were also compared. Last thing was a measurement with a solar cell, a capacitor and an energy management chip to see how it works in practical use as well to see how effective it is. The result is an understanding of the energy demands of applications utilizing WiFi and the requirements to achieve a functioning application as well as an insight into different energy technologies and how they work.

Language: Swedish Key words: wireless sensor, renewable, energy

Innehållsförteckning

1. Inledning.....	1
1.1. Comsel system Ab	2
1.2. Varför självförsörjning	2
1.3. Uppgiftsbeskrivning.....	3
2. Förnyelsebara energikällor.....	3
2.1. Fotovoltaisk energi	4
2.2. Piezoelektrisk energi.....	6
2.3. Termoenergi.....	7
2.4. Pyroenergi.....	9
2.5. RF-energi.....	10
3. Energilagring.....	10
3.1. Batterier	11
3.2. Kondensatorer	12
3.3. Jämförelser.....	13
3.3.1. Urladdningskapacitet	13
3.3.2. Batteri- och kondensatorlivslängd	14
3.3.3. Självladdning.....	14
3.3.4. Specifik energi	14
4. Energichip	15
5. Uppbyggnad av sensor	16
5.1. Grund för trådlös applikation.....	16
5.2. Komponenter	18
5.3. Uträkningar	20
5.4. Mätning	25
6. Resultat.....	29
7. Diskussion	30
8. Slutsatser och rekommendationer	31
Källförteckning.....	32
Bilagor	34

1. Inledning

Levnadsstandarden i dagens i-länder är hög och ständigt växande. Detta leder till att teknologiska vara både tillgängligare och lättare att använda. Energikraven växer vartefter nya produkter når marknaden. Även om de är utvecklade att vara energisnåla så är den totala energiförbrukningen hög. Ett utmärkt exempel är smarttelefonen iPhone 5, som kan kosta upp till 0,39 euro att ladda från tomt till fullt batteri en gång dagligen under ett år. Då låg den förbrukade energin på 3,5 kWh. Ungefär 5 miljoner enheter av iPhone 5 såldes under de första dagarna efter att den lanserades. De enheterna förbrukar totalt 17,5 GWh under ett helt år, med de beräknade 170 miljoner sålda enheterna efter ett år ökar energiförbrukningen till 595 GWh per år. Totala priset för att ladda går upp mot 66,3 miljoner euro (Fisher, 2012).

Förutom telefoner så förbrukar hemelektronik energi i viloläge. Exempel på detta är datorer, mikrovågsugnar och internetmodem. För ett hem kan sådana apparater förbruka mycket energi och därmed kosta mycket. (Pentland, 2011). Energiproblemet förvärras då sådana apparater finns så gott som i alla hem och den totala energiförbrukningen blir hög. Med rätt lösningar behöver elnätet inte belastas i onödan. Miljöpåverkan minskas av mindre utbyggnad av elproduktionen och tekniken fortsätter växa. Enheter med liten energiförbrukning eller lägen med låg energiförbrukning skulle kunna ha en annan matning än elnätet, och på så sätt inte belasta miljön eller elnätet.

Detta arbete har utförts på begäran av Comsel System Ab för att utreda vilka former av energikällor, energilagringmöjligheter och energihantering som kan användas för att inte belasta elnätet eller miljön.

1.1. Comsel system Ab

Consel System Ab grundades av Kristian Heimonen 1989. Då arbetade Comsel System med utveckling och konstruktion av automationsutrustning, datanätverskonsultation och planering och utförande av elinstallationer. I dagsläget arbetar bolaget med nästa generation av AMR-lösningar, Automatic Meter Reading, så kallade "SmartMeters". Dessutom erbjuder Comsel verktyg som ger energianvändaren enkel tillgång till relevant information om sin elförbrukning, tillgång på el och energipriser och så vidare.

1.2. Varför självförsörjning

Med självförsörjande menas att applikationerna inte har en extern energiförsörjning utan har den inbyggd. Detta kan ske på flera olika sätt, som behandlas senare i dokumentet. Orsakerna till att man riktar in sig på självförsörjning är flera.

Driftskostnader hålls nere eftersom inga engångsbatterier behöver bytas och energikostnader hålls nere. Det handlar endast om engångsinvesteringar. Applikationen hålls i drift så länge den finns i områden där den är anpassad att skörda energi och så länge komponenterna håller. Då en extern energimatning inte behövs hålls belastningen på elnätet och därmed elproduktionen låg, vilket leder till mindre behov att utöka produktionen av el.

Eftersom behovet av att producera mer el minskar leder det till ett lägre behov av att bygga fler elproduktionsenheter. Med ett lägre behov av att bygga ut elproduktionen blir ökningen av miljöpåverkan långsammare. Ett annat sätt att sakta ner ökningen av miljöpåverkan ännu mera är att använda miljövänliga material, som är lätta att återvinna.

En annan aspekt är att utrymmen som är kostsamma att förse med el lätt kan utrustas med apparatur så länge någon form av energikälla finns tillgänglig för energiskördning som apparaturen kan använda sig av. Fördelen är att kostnader hålls nere, materiella resurser sparas och eventuella utrymmen som skulle användas för kablar frigörs för annat bruk.

1.3. Uppgiftsbeskrivning

Uppgiften är att utreda vilka typer av energikällor, energilagringmöjligheter och energihanteringstekniker som finns tillgängliga i dag – med tanke på en sensor som ska kunna arbeta utan extern matning.

Energikällorna undersöktes på teorinivå, hur de fungerar, deras kapacitet och vilken sorts användning de lämpar sig för. En energikälla valdes ut för en slutgiltig mätning – som jämförelse mellan teori och praktik. Energilagringen undersöktes på teorinivå, vilka egenskaper olika tekniker har samt jämförelser mellan dem. För energihandlingen undersöktes fyra olika integrerade chip designade för smart energihantering. Ett chip valdes ut för slutgiltig mätning, vilket fanns tillgänglig på en färdig krets för testning.

2. Förnyelsebara energikällor

En energikälla som är förnyelsebar är en källa som inte under långsiktig tid kommer att ta slut eller som snabbt förnyas sig. När det talas om förnyelsebar energi tänker man oftast på större anläggningar. Exempel på detta är solenergi, vindenergi och vågenergi. Det finns dock andra energikällor som är förnyelsebara, såsom bioenergi, värmeenergi och de många former som rörelseenergi finns i. Området växer snabbt och tekniken utvecklas hela tiden. Dessutom kan förnyelsebara energikällor användas direkt i mindre applikationer, såsom den applikation detta arbete delvis handlar om.

Sådana energikällor som kan utvinnas i liten skala är:

- ljus
- mekanisk energi
- värme
- radiovågor.

2.1. Fotovoltaisk energi

Den ljusenergi som är från solen och träffar jordens är i medeltal 1000 W per kvadratmeter, eller 4,2 kWh per dag. Dock inverkar omgivningen på hur mycket energi som faktiskt träffar jordytan, en torr, molnfri öken kan få närmare 6 kWh, medan en nordligare plats kan få närmare 3,6 kWh per dag. För små enheter som kräver några milliwatt och är i solljus eller tillräckligt kraftigt lampljus, är den energin en lämplig lösning eftersom ljus finns mer eller mindre överallt. (How solar energy works)

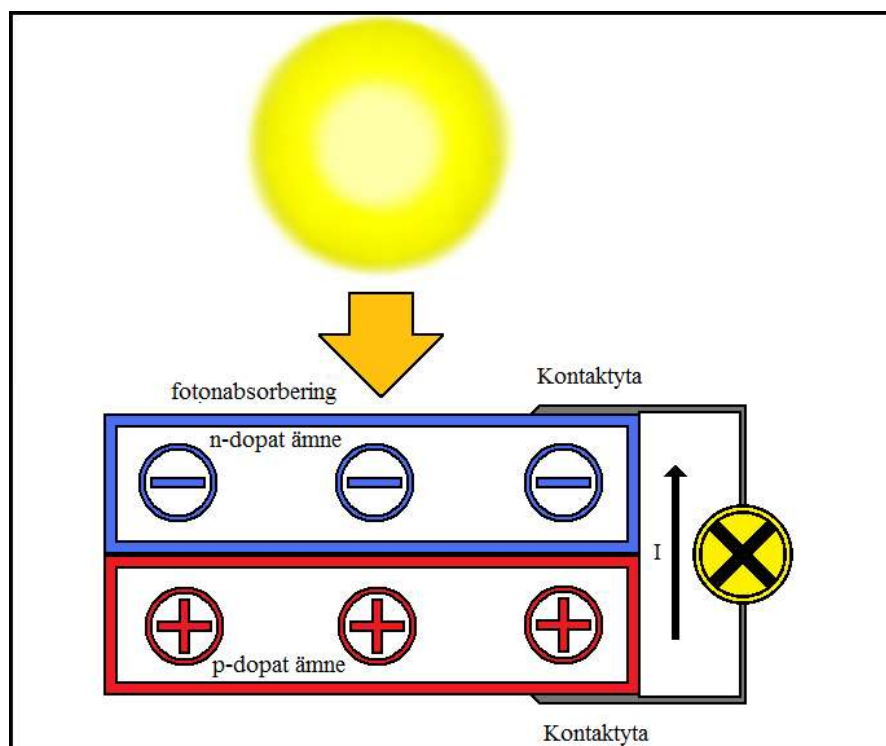
Ljusenergi konverteras till elektricitet genom den fotovoltaiska effekten. Material som har den effekten kallas för fotovoltaiska material och används i solceller. Ljuset som träffar materialet absorberas och omvandlas till elektricitet. Allt ljus konverteras inte till elektricitet på grund av att hela ljusspektrumet inte kan konverteras. Andra aspekter som påverkar utmatningen är ljusintensiteten och infallsvinkeln av ljuset.

Förklaringen av effekten är att fotonernas energi förs över till elektronerna i atomerna. När tillräckligt mycket energi tillförts hoppar elektronerna mellan att vara bundna till atomerna och att vara fria. När en elektron är fri rör den sig mot tomrum vid andra atomer efterlämnade av andra fria elektroner. En spänningsskillnad finns mellan tomrummet och elektronen. Eftersom fotoner har olika energi och elektronerna kräver en viss energi för att frigöras utnyttjas inte alla fotoner som absorberas.

För att få bättre effekt och utnyttja den fria elektronen används n- och p-dopade ämnen. Genom att sammankoppla de båda ämnena och fästa en metallkontakt på vardera ämne så har man byggt en diod. När det n-dopade ämnet absorberar fotoner med energi som är lika med eller högre än bandgapet frigörs elektronerna i ämnet, om metallplattorna är sammankopplade kommer elektronerna att röra sig från de n-dopade ämnet till det p-dopade ämnet via kopplingen. Eftersom elektronen söker sig till en atom med plats för den så är möjligheten stor att den inte kommer att färdas genom kretsen innan den hittat en plats i det n-dopade ämnet, eftersom det finns andra atomer vars elektroner har lämnat tomma platser efter sig. Desto närmare elektronerna befinner sig metallkopplingarna, desto större chans har de att färdas

genom kretsen till det p-dopade ämnet, detta ger upphov till en elektrisk ström. (How does a photovoltaics cell work? u.å s. 1).

Figur 1 illustrerar uppbyggnaden av en enkel solcell. Det n-dopade ämnet med överskott av elektroner absorberar fotoner, som i sin tur frigör elektronerna och sätter dem i rörelse. Det p-dopade ämnet har ett underskott på elektroner vilket leder till att elektronerna i det n-dopade ämnet dras till det p-dopade.



Figur 1: Uppbyggnad av en solcell.

Konstruktionen av det p- och n-dopade ämnet kallas för solcell och är oftast endast en liten del av en hel solpanel. Solceller kopplas ihop med varandra för att bilda en solmodul som kan anpassas till olika system, t.ex 12 volts system. Även moduler kan kopplas ihop med varandra för att bilda en panel. (Knier 2002)

Eftersom fotonerna har olika energi och elektronerna bundna till atomerna kräver energi över en viss gräns för att frigöras, kan inte alla fotoners energi tas till vara. För solpaneler används termen ”omvandlingseffektivitet” som är ett mått på hur mycket energi som omvandlas i solpanelen av det ljus som tas upp av. Detta begränsas av de ämnen som panelen är byggd av. Detta problem löses med celler byggda i flera lager av olika material som har lägre bandgap för fotoner med lägre energi. (Knier 2002).

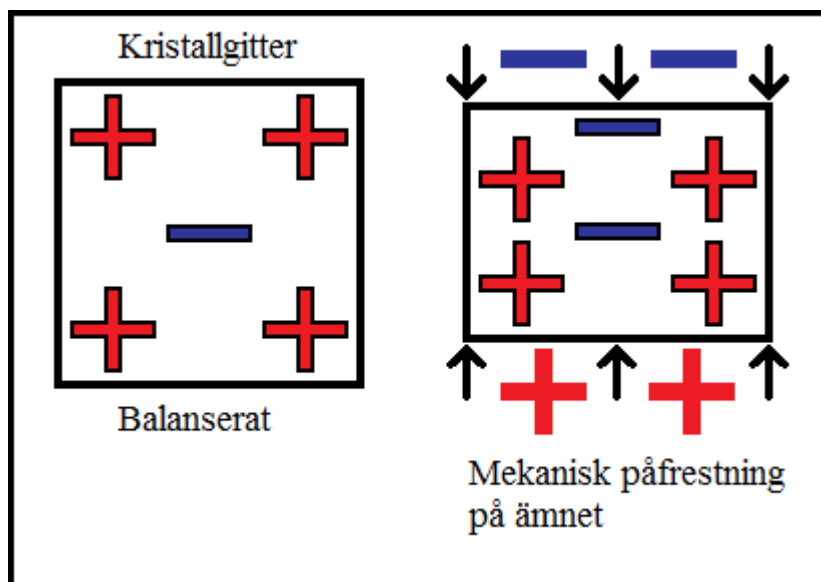
2.2. Piezoelektrisk energi

Mekanisk energi är rörelser av olika slag och den piezoelektriska effekten är en form av konvertering från mekanisk energi till elektricitet. Detta skulle kunna utnyttjas genom att människors egna rörelser genererar energi för att hålla igång mätare på kroppen – eller byggas in i golv och trottoarer för andra ändamål som att hålla igång belysning. (Aries, u.å)

Effekten fungerar på så vis att vissa speciella ämnen, så kallade piezoelektriska ämnen, som utsätts för mekaniska påfrestningar, får en spänningsskillnad mellan två sidor. Detta kallas för den piezoelektriska effekten. Den motsatta effekten finns också, att man kör elektricitet genom ett piezoelektriskt ämne för att deformera det, med andra ord ändra dess form.

I de flesta kristaller råder symmetri i atomplaceringen, men det gäller inte för piezoelektriska kristaller. Dock är de helt elektriskt neutrala, det vill säga att de har en balans i sina laddningar mellan atomerna. En positiv laddning tar ut en negativ laddning i närheten. När ämnet utsätts för mekanisk stress ändrar kristallstrukturen, atomerna trycks närmare varandra och/eller skjuts ifrån varandra. Det i sin tur gör att den laddningsbalans som fanns upphör och det ger upphov till en spänningsskillnad. För den motsatta effekten, genom att applicera spänning över ämnet, måste atomerna omplacera sig i kristallstrukturen för att återbalansera sig själva, vilket leder till att ämnet deformeras. (Woodford, 2012).

Figur 2 illustrerar ett exempel på hur en kristall ser ut utan mekanisk påfrestning. Den negativa jonen är balanserad mellan de positiva jonerna, men under påfrestning förskjuts placeringen och obalans uppkommer.



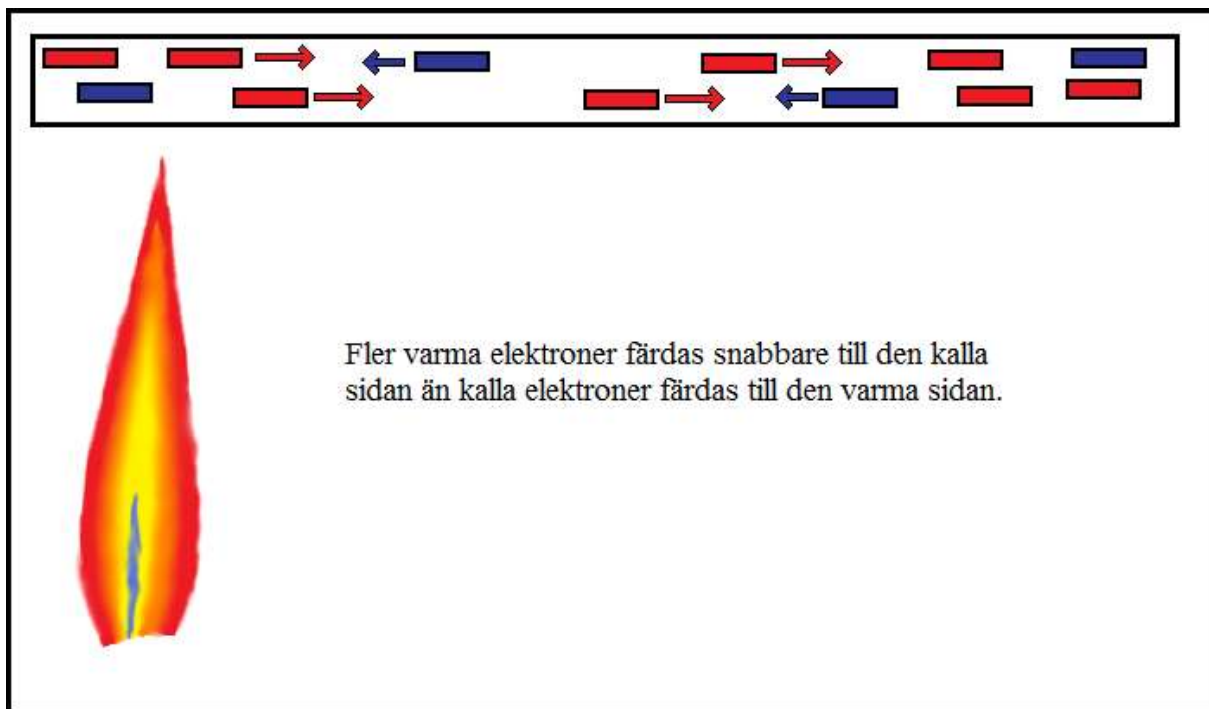
Figur 2: Illustration av ett piezoelektriskt kristallgitter med dess laddningar och samma gitter under mekanisk påfrestning.

2.3. Termoenergi

Ett av flera sätt att konvertera värmeenergi till elektricitet är via den så kallade termoelektriska effekten. Termen används för att beskriva tre olika effekter relaterade till varandra. De effekterna är Seebeck-, Thomson- och Peltiereffekten. Relationen mellan effekterna är att de berör värmeenergi och elektricitet. Av de tre effekterna är det Seebeckeffekten som genererar elektricitet från värme.

När en ledare har olika temperaturer på olika punkter uppstår en spänningsskillnad mellan punkterna. Förklaringen till fenomenet är att elektronerna beter sig som en gas. När energi tillförs ökar elektronernas hastigheter och de flyttar sig längre än de kalla elektronerna. Eftersom elektronerna är fria att röra sig i ämnet kommer de varma elektronerna att färdas längre under samma tidsperiod än de kalla. Det leder till att den punkt som är kall får fler

varma elektroner än den varma sidan hinner få kalla elektroner. När den kalla sidan har fler elektroner har den en negativ laddning jämfört med den varma sidan varifrån elektronerna har spridit sig. (Thermoelectrics)



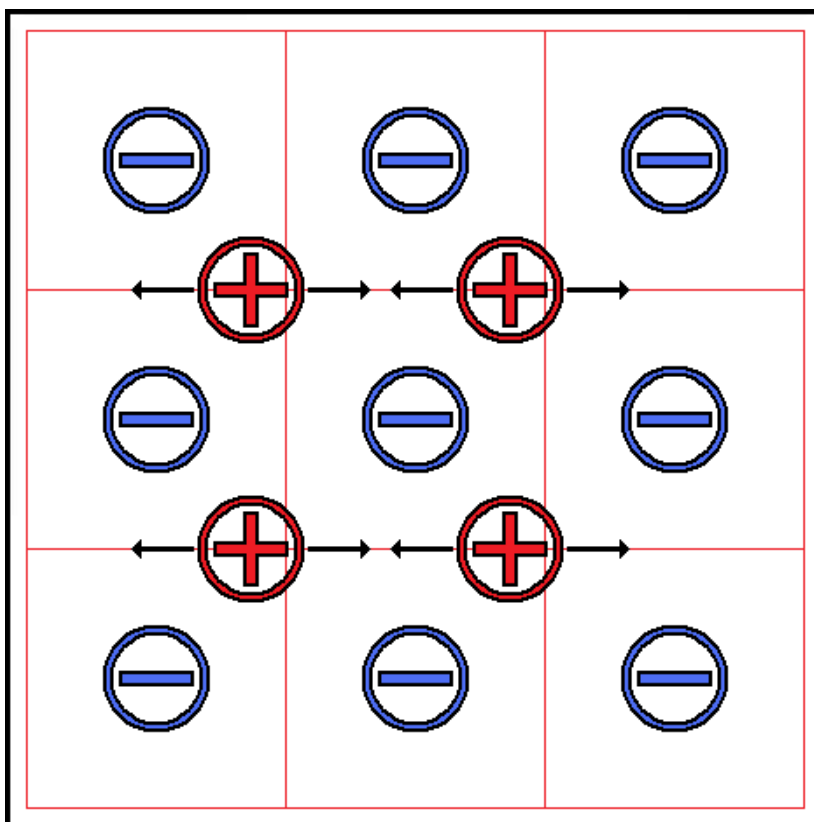
Figur 3: Illustration av termoelektriskt ämne.

Figur 3 illustrerar hur den termoelektriska effekten fungerar. Pilarna visar riktning, längden på pilarna hastighet och färgen röd är varma elektroner medan blå är kalla elektroner. Elden i figuren värmer upp det termoelektriska ämnet på den vänstra sidan, elektronerna tar del av värmeenergin och får därmed högre hastighet. Elektronerna på den högra sidan har inte samma energi och är därför långsammare och färdas inte lika snabbt som de varma. Slutresultatet är att de varma elektronerna färdas snabbare till den kalla sidan än de kalla elektronerna hinner till den varma sidan. Den kalla sidan har fler elektroner än den varma sidan och en spänningsskillnad uppstår.

2.4. Pyroenergi

De kristaller som har den piezoelektriska effekten kan även ha den pyroelektriska effekten. Den påminner om den termoelektriska effekten, men skiljer sig då hela kristallens temperatur ändras bildas spänning till skillnad från termoelektriska ämnen som får spänningsskillnader mellan de varma och kalla områdena.

Effekten har sin förklaring i att joner med positiv laddning får mer energi och flyttar sig relativt till negativt laddade joner i kristallstrukturen, vilket ger upphov till spänningsskillnader. Mängden elektricitet beror helt och hållet på hur temperaturen varierar. Dessutom uppstår lika stor spänningsskillnad vid upphettning som vid nerkyllning, dock är polariteten omvänd. Laddningen är proportionell mot kristallens tvärsnitts area och helt oberoende av längden. (Pyroelectric effect, u.å, s1, 5–6)



Figur 4: Pyroelektriskt ämnes kristallstruktur.

Positionen varierar beroende på temperaturen, vilket leder till att kristallen inte laddningsmässigt är balanserad. Pilarna i figur 4 är ett exempel på hur de positiva jonerna kan förflytta sig beroende på vilken temperatur ämnet har. Med hög temperatur kan de positiva jonerna förflytta sig närmare de negativa jonerna, medan en lägre temperatur resulterar i att de förflyttar sig till höger.

2.5. RF-energi

På senare tid har användningen av trådlösa apparater ökat markant, vilket i sin tur ökar de radiovågor som förekommer. Alla radiovågor innehåller energi och kan klassas som en förnyelsebar energikälla, vilken förekommer i överflöd i mer teknologitäta områden. Därför anses det vara en möjlig energikälla. (Ostaffe, u.å).

För att ta till vara RF-energi används en antenn som tar emot radiovågorna. En RF-DC omvandlare är kopplad till antennen. För att utöka energin på utmatningen kan kretsen utökas med multi-band eller wideband-frekvens områden, och automatisk frekvensinställning. (Ostaffe, u.å)

3. Energilagring

Att lagra energi har alltid varit ett viktigt delområde inom tekniken. Det är också ett teknikområde som utvecklas snabbt och i många olika riktningar.

För självförsörjande applikationer är energilagringen viktig eftersom matningen sällan klarar av att själv förse applikationen med den mängd energi som krävs för kontinuerlig drift. Ett krav är att applikationen arbetar med en vilotid där den teknik som sköter hinner laddas upp med mer energi än den applikationen tar. I sådana fall sker en total urladdning där matningen inte klarar av att ladda lagringsenheten till den nivå den behöver för att kunna ha en aktiv period, vilket tas upp i kapitlet ”Grund för trådlös applikation”. (*Importance of energy storage, 2012*).

3.1. Batterier

Ett batteri är en enhet som på elektrokemisk väg producerar en elektrisk laddning när det kopplas till en krets. Den elektrokemiska varierar mellan batterier men principen är den samma. När ett batteri kopplas till en krets startar processer för både anoden och katoden. I den kemiska processen frigörs elektroner på anodens sida - medan katodsidan absorberar elektroner. Batteriet fortsätter producera elektricitet tills endera sidan får slut på ämnen som kan uppehålla den kemiska reaktionen. Är batteriet ett primärbatteri kan det inte laddas om för den kemiska processen kan vändas. Med sekundärbatterier kan processen dock köras andra vägen och på så vis laddas om. (Brain och Bryant och Pumphrey, u.å s 1, 4).

Eftersom batterier är begränsade till en användning, kastas de bort när de saknar laddning. Då de innehåller kemikalier för den kemiska reaktionen är de – beroende på vilka kemikalier som använts - farliga för människor, djur och natur. Sekundärbatterier som går att ladda om innehåller också farliga kemikalier, men är ändå mer miljövänliga än ett vanligt primärbatteri. Fördelarna med laddningsbara batterier är:

- Mindre potentiell påverkan på icke-förnyelsebara naturliga resurser.
- Mindre potentiell påverkan på global uppvärmning.
- Mindre potentiell påverkan på luftföroreningar.
- Mindre potentiell påverkan på försurningen av luft.
- Mindre potentiell påverkan på vattenförorening.

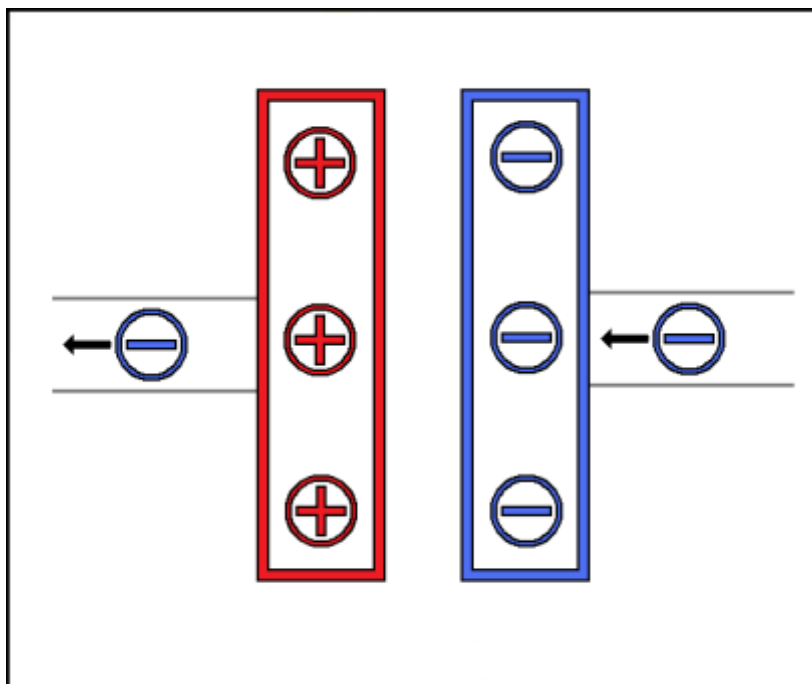
(UNIROSS Study of the environmental impact of batteries. 2007)

Under senare tid har en ny typ av laddningsbara batterier utvecklats, så kallade ”tunnsfilmsbatterier”. Dessa batterier är extremt tunna, flexibla och kan dessutom tillverkas i flera olika former. Förutom de egenskaperna har batteriet hög energidensitet, dvs att det kan lagra mycket energi i relation till den låga vikten. För små applikationer är denna typ av batterier närmast en ideal lösning.

3.2. Kondensatorer

Till skillnad från batterier kan kondensatorer inte generera nya elektroner utan endast spara dem. Orsaken är att det inte sker någon process inuti kondensatorerna, de består endast av två parallella metallplattor med ett icke-ledande material mellan sig. (Brain och Bryant. u.å s. 1). Metallplattorna kopplas till kontakter vilka används för att koppla kondensatorn in i kretsen. När elektroner flyter genom kretsen från strömkällans negativa pol absorberas de i den metallplatta som är kopplad till den sidan, och den andra metallplattan förlorar elektroner till strömkällans positiva pol, med andra ord förser strömkällan kondensatorns ena metallplatta med elektroner medan den på samma gång drar elektroner från den andra plattan. I kondensatorn uppstår då en spänningsskillnad mellan plattorna eftersom det är skillnad i elektronantalet mellan plattorna. (Brain och Bryant, u.å, s. 2).

Figur 5 visar hur elektroner förses till den högra metallplattan, vilken därmed får fler elektroner. Den andra plattan förlorar elektroner och den blir positivt laddad jämfört med den högra plattan, en spänningsskillnad uppstår.



Figur 5: Elektroner absorberas i den vänstra plattan och tas från den högra.

En speciell typ av kondensatorer som kallas för superkondensator finns tillgängliga i dag. Andra namn är ultrakondensator och dubbellager-kondensator. Dessa kondensatorer skiljer sig från vanliga kondensatorer därför att de är byggda med andra ämnen och tekniker, vilket gör att de kan lagra mycket mer energi. En nackdel är att den högsta spänningen som superkondensatorerna tål är 2,7 volt. Om spänningen är högre, minskar livstiden för komponenten. Vanliga kondensatorer klarar av betydligt högre spänningar. (Supercapacitor)

3.3. Jämförelser

Batterier och kondensatorer är för olika ändamål men fungerar ändå med samma princip, att lagra energi. Skillnaderna mellan de två olika teknikerna är stora och därmed beter de sig olika och har helt skilda karaktärsticker. De aspekter som jämförs är urladdningskapaciteterna, livslängd, självurladdning och den specifika energin.

3.3.1. Urladdningskapacitet

Den maximala ström som kan laddas ur på en gång är enhetens urladdningskapacitet. Kondensatorernas fördel i jämförelse med batterierna är att de kan leverera mycket ström på en gång. Batterier tar skada om den övre gränsen överskrids. Gränsen bestäms av den inre resistansen på komponenterna. En annan aspekt med urladdningen för kondensatorer och batterier är spänningen. Kondensatorns spänning faller snabbt vid urladdning medan ett batteri däremot behåller sin spänning medan energi finns tillgänglig. I praktiska fall betyder det att utan någon form av omvandling lämnar stora delar av kondensatorns lagrade energi oanvänd då dess spänning faller under den undre gräns som kretsen kräver för att fungera. Eftersom batterier håller spänningen klarar de av att förse kretsen tills batteriet är slut. (Supercapacitor)

3.3.2. Batteri- och kondensatorlivslängd

Batterier har en begränsad livslängd på grund av kemikalierna som är direkt inblandade i lagringen av energin. Kemikalierna försämras vartefter batteriet används och det förlorar då sin kapacitet. Kondensatorernas kemikalier har ingen annan uppgift i komponenten än att separera de två plattorna från varandra. Kemikalien är då inte direkt inblandad i lagringen och tärs inte på annat vis än genom uttorkning. På grund av att upp- och urladdningar tär på kemikalierna i batterier är deras upp- och urladdningar begränsade. (Supercapacitor)

3.3.3. Självladdning

I energilagringseenheter sker alltid en urladdning även då enheten inte är kopplad till något som laddar ur den, det är självladdning. Kondensatorer har hög självladdning jämfört med batterier. En superkondensator kan laddas ur från 100 % till 50 % på 30–40 dagar medan ett Li-Ion batteri endast laddas ur 5 % per månad. Det är även skillnad mellan olika kondensatorers självladdning samt mellan olika typer av batteriers självladdning. Kondensatorer har dock oftast större självladdning. (Supercapacitor)

3.3.4. Specifik energi

Ett batteri har mycket högre energi per kg än vad en kondensator har. En superkondensator kan ha upp till 30 Wh per kg, men det är ändå endast en liten del av vad ett Li-Ion batteri klarar av. Ett batteri klarar med andra ord av att laddas med mer energi per kilogram än en kondensator klarar av, vilket utrymmesmässigt är en fördel för batteriet.

Som energilagringseenhet har batteriet klara fördelar mot alla kondensatorer. Det har högre specifik energi, håller spänningen vid urladdning och oftast mindre självladdning. Kondensatorn har dock längre livstid och klarar stora påfrestningar vid urladdningar. (Supercapacitor)

4. Energichip

När endast en begränsad mängd energi är tillgänglig måste den användas så effektivt som möjligt. Det är viktigt för att förlänga den tid under vilken applikationen är funktionsduglig när laddning inte sker. Energin som finns tillgänglig ska helst gå till applikationens huvuduppgift samt att hålla den i ett viloläge med minsta möjliga energiåtgång. I sådana fall att energi används till andra ändamål - som inte främjar applikationens uppgift - går energin till spillo.

För effektiv hantering av energi finns speciella integrerade kretsar. Deras uppgift är att så effektivt och sparsamt som möjligt lagra den energi som kommer från matningen av applikationen. Kretsarna kallas för PMIC, vilket står för Power Management Integrated Circuit. Dessa kretsar bygger på att de konverterar energin som kan vara ostabil, ha störningar eller vara periodisk från olika små energiskördare till en stabil energi som lagras i laddningsbara batterier eller kondensatorer.

Förutom en bra konvertering har en bra PMIC även övervakning av energilagringen genom olika trösklar så som en undre gräns och övre gräns på vad spänningen över batteriet får vara samt en signal när batteriet kan användas. Detta varierar dock mellan olika chip eftersom problem uppstår då olika batterier har olika trösklar. En del chip programmeras för ett visst batteri, medan andra chip kan tillverkas så att användaren själv får programmera in gränserna. (Stefano Vignati, 2012, s 14 – 15).

5. Uppbyggnad av sensor

Det inledande arbetet var att utreda vilka sorters energikällor det finns, vilka som är möjliga att använda i liten skala och huruvida dessa kan användas för vardagligt inomhusbruk. Liten skala i detta fall betyder en mindre enhet som passar i handen. Energilagringen undersöktes efteråt. Batteriers och kondensatorers för- och nackdelar studerades samt jämfördes. Den sista delen att undersöka för energidelen var energihanteringen. Inom det området finns färdiga lösningar, så kallade Power Management Integrated Circuits. Dessa chip skiljer sig oerhört mycket från varandra. Därför var det nödvändigt att ta reda på vilket chip som passade bäst för detta arbete.

Nästa steg var att undersöka andra komponenter för applikationsfunktionen. De komponenterna var microprocessorn, sensorer och trådlösa sändare. Kriterierna för komponenterna var först och främst energikonsumtionen. Ett annat kriterium var priset på komponenten. För sensorn spelade funktionen inte så stor roll. Orsaken är att priset varierar mycket beroende på vad sensorn mäter.

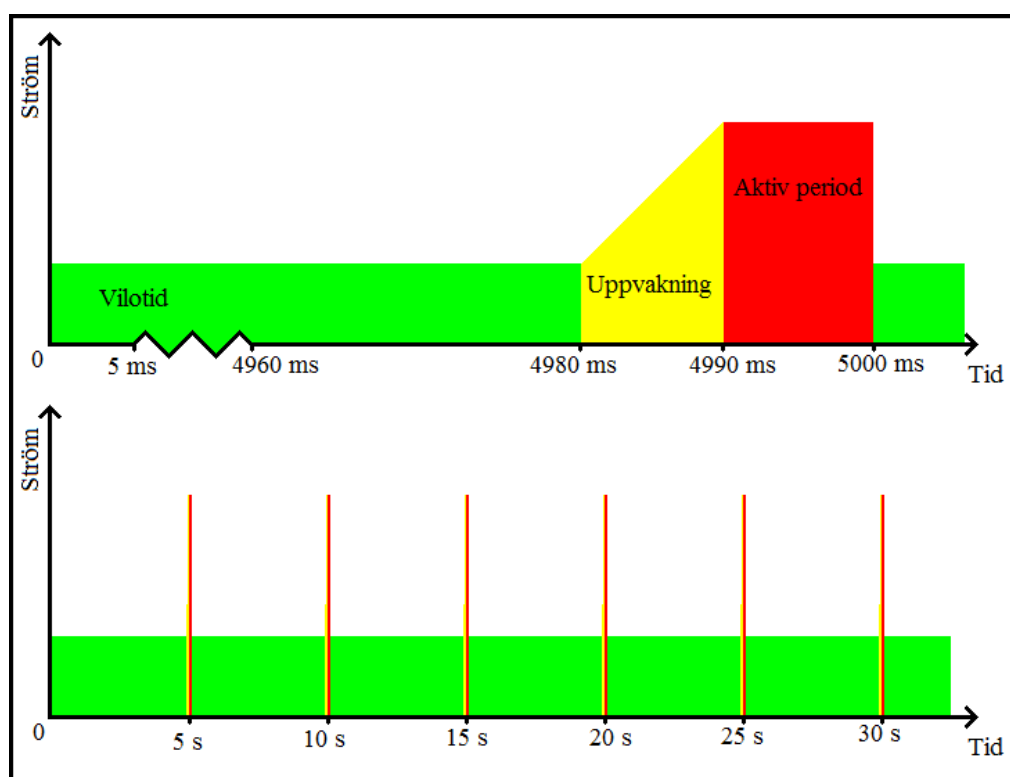
5.1. Grund för trådlös applikation

I dagsläget är strömförsörjning på liten nivå inte tillräcklig för att försörja de komponenter som behövs för en sensor med WiFi. Det beror på att de involverade komponenterna drar så mycket energi att matningen inte räcker till. En del av lösningen på problemet är att använda en energilagringseenhet, samt att olika aktivitetsperioder används för att minska energiåtgången. En period under vilken den är i standby, en snabb uppvakning samt en aktiv period. Under den aktiva perioden försörjer lagringseenheten applikationen med den energi som behövs. I viloläget laddas lagringseenheten om så är möjligt.

Viloläget är det viktigaste läget eftersom det tillåter lagringseenheten att laddas upp. Kriteriet för viloläget är att den energi som går åt inte överskrider den tillgängliga energin från matningen. I sådana fall att matningen inte räcker till laddas lagringseenheten ur totalt och applikationen slutar fungera. Mellan den period som applikationen är i viloläge och den tid

som den utför sina uppgifter finns ett uppvakningsskede. Under det skedet gör applikationen inget annat än att förbereder sig för att utföra sina uppgifter. Eftersom inga egentliga uppgifter utförs och den inte är i viloläge går energi till spillo. När komponenterna vaknat upp och kan användas följer den aktiva perioden. När det sker utförs applikationens uppgifter. Efter den aktiva tiden återgår applikationen tillbaka till viloläget.

Figur 6 illustrerar ett exempel på hur en strömförbrukningscykel kan se ut. Det gröna området är låg strömförbrukning, vilken strömförsörjningen klarar av att förse kretsen med samtidigt som den kan ladda lagringsenheten. Det gula området är den ström som går åt när komponenterna vaknar upp. Den energi som går åt till uppvakningen kan klassificeras som energi som går till spillo. Den röda perioden är den period under vilken lagringsenheten matar kretsen eftersom energikällan inte klarar av att förse kretsen med tillräckligt mycket ström.



Figur 6: Exempel på hur en period kan se ut samt under en längre period.

Strömprofilen kan se olika ut mellan olika applikationer. Tiderna för de olika lägena kan variera. Allt beror på för vad applikationen tagits fram för. För en sensor som mäter något sådant som ändrar långsamt behöver applikationen inte vara aktiv flera gånger under en kort tid. En temperatursensor i ett vanligt rum behöver endast skicka information om temperaturen

en gång var tionde minut, eftersom ändring inte sker alltför snabbt. Dessutom kan en sådan funktion implementeras i processorn, så att den minns den tidigare temperaturen. Fördelen är att den kan jämföra tidigare värden med nya. Utifall att värden inte ändrats eller endast marginellt behöver den inte skicka samma information en gång till.

I sådana fall att energikraven är för höga under den aktiva perioden finns risk att normala batterier inte kan ge ut den ström som behövs på en gång. För att undvika ett sådant problem kan en kondensator användas med batteriet. Under viloläget laddar batteriet upp kondensatorn. Under uppvakningen och den aktiva perioden förser kondensatorn kretsen med den ström som behövs. Dimensioneringen av kondensatorn måste vara sådan att spänningsfallet över den inte underskrider minimispänningen för kretsen. Långa aktiva perioder kräver kondensatorer med stor kapacitet. En underdimensionering av kondensatorn riskerar leda till att spänningen sjunker under minimikravet.

5.2. Komponenter

Det som behövs för applikationen är en microprocessor, sensor och en komponent som kan kommunicera trådlöst. I detta fall undersöktes det om en WiFi-modul kunde användas för en trådlös applikation. Kravet på komponenterna är så litet strömbehov som möjligt - och så snabba funktioner som möjligt. Bilaga 1, sidorna 1 till 5, är listor på olika komponenter som kunde användas samt listor på vilka som slutligen valdes.

Den lågenergiapplikationsprototyp som Texas Instruments utvecklat, använder en microprocessor som även valdes till detta projekt. Microprocessorn använder en ny låg energiteknik som gör den extra energisnål både i viloläge och i drift. Dessutom kräver den inte mycket spänning för att vara i drift. Den valdes främst att den redan bevisats fungera i en liknande applikation och på grund av dess låga driftskrav. Microprocessorn valdes av Comsel.

Flera olika sensorer och sensortyper söktes fram som gick följde kriterierna. De sensorer som plockades fram finns på sida 3 i bilaga 1. De typer som fanns tillgängliga var kolmonoxid-, koldioxid-, luftfuktighets-, ljus- och temperatursensorer. Kombinationerna luftfuktighetssensorer och koldioxid, temperatur och luftfuktighetssensorer fanns också. De

sensorer som mäter kolmonoxid och koldioxid krävde uppvärmning innan en mätning gjordes, vilket leder till att energi går åt för det ändamålet. Den tid som krävdes för uppvärmningen varierade beroende på ett membran som fanns i komponenten. Dessutom var priset på komponenterna höga, och ännu högre för de kombinerade sensorerna. Kolmonoxidsensorn krävde dessutom en högre spänning än de andra utvalda komponenterna.

Ljussensorerna passade bra både med ström- och spänningskraven. Även priserna var lämpliga. Dock är det möjligt att en ljussensor inomhus avsedd för vardagligt bruk är ointressant i längre utsträckning. De två luftfuktighetssensorerna var båda bra gällande energiåtgången. Det kan även vara intressant att hålla koll på luftfuktigheten, men priserna på komponenterna är högre än ljus- och temperatursensorerna. De kombinerade luftfuktighets- och temperatursensorerna hade även låg energiförbrukning. Priset var dock högre än en normal fuktighetssensor.

Slutligen valdes precisionstemperatursensorn STLM som sensor. Användaren kan välja temperaturområdet inom vilket den arbetar. Dessutom kan den använda låg spänning för att fungera. Även strömbehovet i funktion är litet. Det lilla strömbehovet gör att självupphettning är försumbar. Prisklassen av sensorn är även lämplig, vilket gör att den är vettig för en inomhussensor.

WiFi-delen av applikationen var den som krävde mest energi. Som ses i bilaga 1 sida 1 hittades fyra moduler och tre chip. Modulerna är färdiga lösningar som kan användas direkt medan chipena måste ha tilläggskomponenter. Av alla sju så var det endast två som data om strömmen fanns tillgängliga. Econias ESC32XX-modulen använder mindre energi än RTX RTX4100_IN-modulen när de är på. Under viloläget drar dock RTX-modulen mindre energi, vilket också gäller när de är helt avstängda. Under standby-läget håller sig modulerna kopplade till nätet medan de är helt bortkopplade när de är avstängda.

När WiFi modulerna startas igen måste de kopplas upp till nätet igen. En uppkoppling tar tid och energi. Det ideala skulle vara att kunna använda viloläget. Problemet var dock att inga små inomhussolpaneler kan ge den ström som krävs. För att använda WiFi krävdes det att den delen stängdes av i viloläget. Både ECS32XX och RTX4100_IN valdes för uträkningarna.

Intresset låg i att se hur stor skillnad det blev i energiförbrukningen. Den första modulen hade lägre förbrukning i drift men högre förbrukning i vila.

Flera olika solceller från olika leverantörer fanns tillgängliga. Solcellerna finns i bilaga 1 på sida 2. Av de sju som valdes ut var det endast två stycken som tagits fram för inomhusbruk. Cymbets CBC-PV-01 var av rätt storlek. Även Sanyo semiconductors AM-1815 var rätt storlek men hade lägre kapacitet än CBC-PV-01. Energihanteringskretsen omvandlar spänningen och strömmen till det som behövs för laddning av batterier och kondensatorer. Därför kan en solcell med lägre spänning användas.

De energihanteringskretsar som plockades fram finns i bilaga 1 på sida 4. BQ25504 av Texas Instruments valdes på grund av dess mångsidighet och för att den är enkel att programmera. Dessutom kunde flera olika lagringstekniker användas. LTC4071 av Linear Technology var framtagen för Li-Ion- och polymerbatterier. MAX17710 av Maxim fungerade mer som en processor samt hade förprogrammerade inställningar. Cymbet Enerchips CBC915 var också endast för batterier samt programmerbar med dator. BQ25504 var den enklaste att använda samt hade mer lagringsmöjligheter än de andra.

Till energilagringen valdes tunnfilmsbatterier. Det första batteriet var MEC202, som är ett batteri med hög kapacitet, men med ett högt pris och ingen kapacitet för massproduktion. Det andra alternativet var CBC050 av Cymbet. Tunnfilmsbatteriet hade betydligt lägre kapacitet men också ett lägre pris. Dessvärre räckte den låga kapaciteten inte till för att driva applikationen med eller utan laddning. Det användes dock till att räkna ut de kringliggande komponenterna till energihanteringskretsen.

5.3. Uträkningar

För att få en klarare bild av hur energiåtgången för komponenterna var räknades den ut. Bilaga 1 från sida 6 framåt innehåller de uträkningar som gjorts. Energiåtgången räknades för viloläget, uppvakningen, det aktiva läget och totala åtgången. Dessutom räknades hur många cykler som de två tunnfilmsbatterierna enskilt klarar av utan laddning. Det gjordes med båda WiFi-modulerna i uträkningarna. Även med teoretiskt energisnålare WiFi-moduler räknades

samma sak ut. För batteriet räknades även stödkondensatorer ut. Energihanteringskretsen kräver även andra värden för programmeringsresistorerna för batteriet CBC050. Beräkningar för programmeringsresistorerna gjordes också.

För att räkna ut den energi som krävs användes formeln:

$$I \cdot U \cdot t = E$$

I är strömmen som komponenten behöver, U är spänningen över komponenten och t är tiden i sekunder för läget. Energin räknas ut för att lättare överblick få över batteriernas kapacitet och hur mycket energi som komponenterna kräver. På sida 7 finns båda resultaten över hur mycket energi kretsen behöver med den första Econias WiFi-modulen samt RTX-modulen.

Även fast RTX-modellen drar något mindre ström under vilotiden räcker det inte till för att dra ner hela energiförbrukningen då strömförbrukningen under den aktiva perioden är mycket högre.

Eftersom den totala energilagringsskapaciteten hos CBC050-batteriet saknades i databladet räknades dess energikapacitet ut, och jämfördes med samma formel för MEC202-batteriet som hade energikapaciteten skriven i databladet. Dessutom räknades förhållandet mellan de två batterierna ut som användes för att räkna ut CBC050-batteriets energikapacitet som kontroll. Den formel som användes var den samma som användes för att räkna ut energiåtgången för komponenterna.

I är batteriets Amperetimmar, U är batteriets spänning och t är 3600 sekunder. Resultatet var att CBC050 batteriet klarar av att lagra 6,84 J. En uträkning för att kontrollera MEC202-batteriet som märkts till 31 Joule gjordes för att se om formeln är rätt. Uträkningen gav 31 Joule för MEC202-batteriet.

Den andra kontrollen som gjordes gällande förhållandena mellan batterierna gjordes på följande vis:

$$\frac{\text{CBC050 kapacitet}}{\text{MEC202 kapacitet}} = \text{kapacitetsförhållande}$$

Först räknades förhållandet mellan de båda batteriernas kapacitet. Det ger hur stor eller liten kapacitet batterierna har i förhållande till varandra.

$$\frac{CBC050 \text{ spänning}}{MEC202 \text{ spänning}} = \text{spänningsförhållande}$$

$$\text{Spänningsförhållande} \cdot \text{kapacitetförhållande} = \text{riktigt förhållande}$$

$$MEC202 \text{ energikapacitet} \cdot \text{riktigt förhållande} = CBC050 \text{ energikapacitet}$$

Att räkna förhållandet mellan batterierna gav också svaret 6,84 J. CBC-batteriet klarar då med andra ord av att lagra 6,84 J.

Därefter räknades uppladdningstid av batterierna, utan och med urladdning, och hur många cykler som batterierna klarar av med de två WiFi-modulerna, samt hur de skulle klara av samma sak med WiFi som är en tiondel snålare. Uträkningarna görs på sida 9 i bilaga 1. Stödkondensatorerna som hjälper batteriet vid stora strömmar räknas på sida 10 i bilaga 1. Formlerna för att räkna ut stödkondensatorn togs från ”eZ430-RF2500-SEH Solar Energy Harvesting Development Tool” databladet sid 16. (eZ430 datablad, s 16)

$$\frac{t}{R \cdot \left(-\ln \left(\frac{V_{min}}{V_{max}} \right) \right)} = C$$

C är kondensatorns minsta tillåtna kapacitans för att inte underskrida V_{min} under tiden t . V_{min} är den lägsta tillåtna spänningen. Fyra olika värden räknades ut för att batterierna har olika spänningar, vilket leder till att kondensatorns högsta spänning varierar och för att se hur WiFi-modulerna påverkar kondensatorvärdena. Resultatet var väldigt kraftfulla kondensatorer långt över 1 Farad. För att kontrollera att svaren stämmer kodades ett enkelt program i MATLAB för att rita upp kondensatorernas upp- och urladdningskurvor. Programmet och tillhörande kurvor finns i bilaga 2. Endast de två lägre kondensatorernas kurvor ritades upp. Kontrollräkningarna och kurvorna visar att de värden som räknats ut för stödkondensatorerna stämmer. Eftersom kondensatorerna endast får ha ett litet spänningsfall på 0,5 V som max och under tiden 5 s så måste kondensatorerna ha hög kapacitet eftersom högre kapacitet leder till

längre urladdningstid. En kondensator har snabbare urladdning när den är fullt laddad. Hög kapacitet krävs för att klara av det lilla spänningsfallet.

Laddningstiderna för kondensatorerna räknades också. Om kondensatorn är för långsam att ladda till optimal spänning innan den nästa aktiva perioden kan den laddas ur för mycket, vilket leder till underspänning för kretsen. Formeln för urladdningen av stödkondensatorer togs från ”eZ430-RF2500-SEH Solar Energy Harvesting Development Tool” databladet sid 16. (eZ430 datablad, s 16)

$$R \cdot C \cdot \left(-\ln \left(1 - \frac{V_{min}}{V_{max}} \right) \right) = t$$

R är batteriets resistans, C är kondensatorns kapacitans, V_{min} är den lägsta tillåtna spänningen som kondensatorn laddats ur till och V_{max} är den maximala spänningen kondensatorn laddas till. Svaret t är i sekunder. Kondensatorerna har höga laddningstider men inte i närheten på 595 sekunder som är gränsen för detta projekt. Då påbörjas uppvakningen och den aktiva perioden. Problemet är att så kraftiga kondensatorer endast finns som superkondensatorer, som bara kan laddas upp till 2,7 V innan de tar skada, eller som stora kondensatorpaket.

Det sista momentet var att räkna ut de resistanser som programmerar tröskelvärdena åt PMICen BQ25504. De värden som behövs är ett MPPT-värde för solpanelen som rekommenderas vara mellan 0,7 till 0,8. Dessutom behövs en övre och undre gräns för battery-ok-signalen samt över- och underspänningsskyddsvärden. Formlerna togs från BQ25504:s datablad. (BQ25504 datasheet, s 15–17)

MPPT-värde:
$$V_{INDC}(OpenCircuit) \cdot \left(\frac{R_{OC1}}{R_{OC1} + R_{OC2}} \right) = V_{REF SAMP}$$

Underspänning:
$$V_{BIAS} \cdot \left(1 + \frac{R_{UV2}}{R_{UV1}} \right) = V_{BATUV}$$

Överspänning:
$$\frac{3}{2} V_{BIAS} \cdot \left(1 + \frac{R_{OV2}}{R_{OV1}} \right) = V_{BATOV}$$

Batteri OK:
$$VBIAS \cdot \left(1 + \frac{R_{OK2}}{R_{OK1}}\right) = VBAT \text{ OK } PROG$$

Batteri OK Hyst:
$$VBIAS \cdot \left(1 + \frac{R_{OK2} + R_{OK3}}{R_{OK1}}\right) = VBAT \text{ OK } HYST$$

Värden som valdes var:

- MPPT-värde: 0,8
- Underspänning: 3 V
- Överspänning: 3,85 V
- Batteri OK: 3,5 V
- Batteri OK hysteres: 3,6 V

Förutom formlerna finns krav på summorna av resistorerna. Alla resistorpar ska ha så nära som möjligt den totala resistansen av 10 M ohm. Resultaten av de värden som räknades ut är:

- MPPT-värde: 0,79
- Underspänning: 2,69 V
- Överspänning: 3,85 V
- Batteri OK: 3,46 V
- Batteri OK hysteres: 3,64 V

5.4. Mätning

För att få reda på hur energihanteringskretsen verkligen fungerar i praktiken samt vilken precision den har, kopplades en krets upp med en utomhussolpanel, en kondensator, en last och ett utvecklingskretskort upp. En elektrolytkondensator användes för att lättare se upp- och urladdningskurvan för den. Ett batteri tar längre tid att ladda upp och har andra upp- och urladdningskurvor som är långsammare än kondensatorernas.

Mätningen gick ut på att testa energihanteringskretsen BQ25504. För att testa kretsen användes en solpanel byggd för utomhusbruk tagen från en trädgårdslampa. En 10 μF elektrolytkondensator med märkningen 63 V användes som lagringningsenhet och ett motstånd på 10 kohm som last för elektrolytkondensatorn. BQ25504 kretsen var färdigt kopplad på ett evalueringskretskort där alla sidkomponenter fanns kopplade, den var med andra ord förhandsprogrammerad.

Kondensatorn användes för att få en bättre överblick på själva laddningsprocessen. Ett laddningsbart batteri har en närmast konstant spänning då det är laddat och tar längre tid att ladda än en kondensator.

BQ25504 har dessa egenskaper vad gäller lagringensheten:

- Battery OK signal: En signal som ges ut via en speciell ingång när lagringensheten når en viss spänning.
- Överspänningsskydd: En viss gräns över vilken spänningen över lagringensheten inte får överskrida.
- Underspänningsskydd: En viss nedre gräns vilken spänningen över lagringensheten inte får underskrida.

Det ända sättet att programmera BQ25504 är med motstånd, och för mätningen användes förprogrammerade värden. Överspänningsskyddet var 3,1 V. Det betyder att spänningen över kondensatorn inte överskrider 3,1 V. Underspänningsskyddet var på 2,2 V. Battery-OK-

signalen blev hög när spänningen över kondensatorn blev 2,8 V och blev sedan låg igen när spänningen gick under 2,4 V.

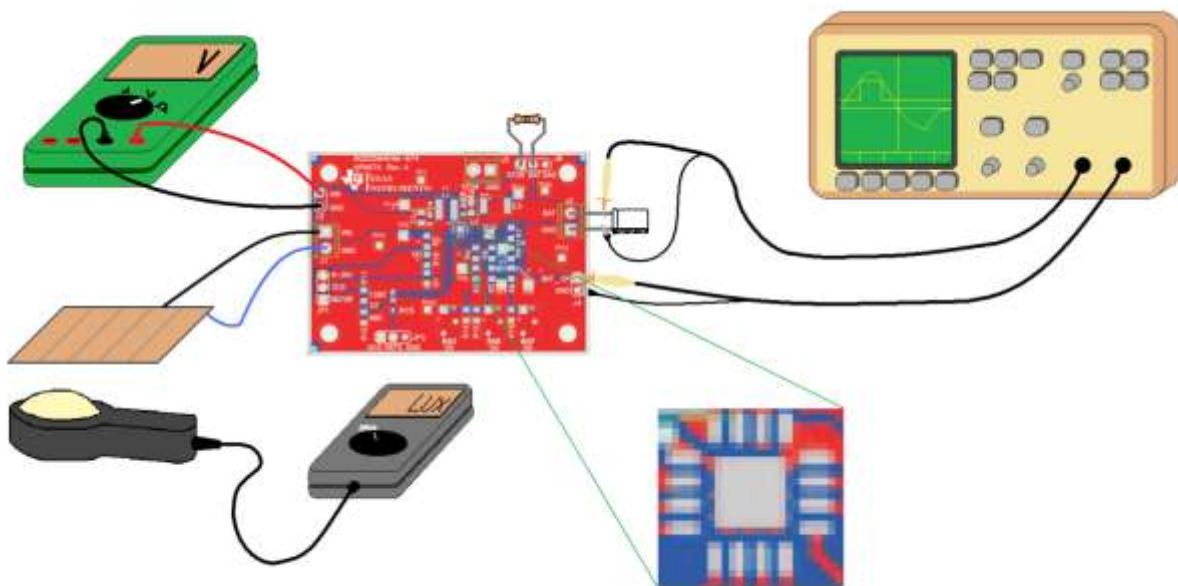
I praktiken kan dessa värden variera beroende på motståndenas riktiga resistanser eftersom de kan skilja sig från de märkta värdena.

För mätningar används:

- LUX meter: mäter ljusstyrkan.
- Multimeter FLUKE 867B: Mäter spänningen över solpanelen.
- Oscilloskop HP 53645D: Visade spänningskurvorna över kondensatorn.

Mätningar som gjordes var:

- Ljus över solpanelen.
- Spänning som solpanelen gav ut vid de ljusstyrkor som uppmättes.
- Battery OK-signalen.
- Överspänningsskyddet.
- Hur de olika ljusstyrkorna påverkade laddningen av kondensatorn.



Figur 7: Uppkoppling av testkrets.

Mätningarna utfördes så att ett tätt skydd lades över solpanelen för att den skulle sluta mata och kondensatorns spänning sjönk ner under UV-spänningen 1,8 V. Därefter togs skyddet bort medan spänningen från solpanelen mättes från det att laddningen började till det att kondensatorns spänning nått 3,1 V. Bilder togs av oscilloskopbilderna, vilket var det enklaste alternativ att få kurvorna som oscilloskopet skrev. Enda editeringen som bilderna genomgått är att de förminskats och kurvorna gjorts tydligare och fått skilda färger för att skilja dem åt. De röda linjerna är spänningen över kondensatorn, medan den blåa linjen är den signal som kommer från BAT_OK utgången. Bilderna tagna från mätningen finns i bilaga 3.

Under mätningarna observerades även tröskelvärdena för:

- BAT_OK_övre gräns: 2,8 V
- BAT_OK_nedre gräns: 2,4 V
- Överspänningsskydd: 3,1 V
- Underspänningsskydd: 1,8 V

Den första mätningen gjordes med 1300 lux, som var den högsta ljusstyrkan som fanns tillgänglig under den tid mätningarna utfördes. Spänningen från solcellen var 0,335 V konstant under den tid då spänningen över kondensatorn var under Underspänningsskyddströskeln. Det är på grund av kallstartsfunktionen som finns implementerad i BQ25504. En oreglerad boostconverter sköter om kallstarten. Den är i bruk så länge som spänningen över lagringsenheten underskrider 1,8 V över kondensatorn.

När spänningen över kondensatorn sedan översteg 1,8 V steg spänningen från solcellen till 0,402 V tills kondensatorspänningen blev 3,1 V. Solcellens spänningen steg upp till 0,903 V. Figur nummer 3 i bilaga 3 är från oscilloskopet för mätningen med 1300 lux. Enligt okulär granskning tar det ca 20 sekunder att ladda kondensatorn från 0,9 V till 3,1 V, ungefär 16 sekunder från 0,9 V till 1,8 V och 4 sekunder från 1,8 V till 3,1 V. När strömmen skulle mätas flimrade mätaren mellan 0,01 μA och 0,00 μA , med andra ord var strömmen för låg för att mätas med den multimeter som användes.

Nästa steg var att sänka ljusstyrkan till 800 lux. Spänningen var till en början 0,335 V tills kondensatorspänningen kommit upp till 1,8 V. Därefter steg inspänningen till 0,402 V, lägre än vid 1300 lux. När kondensatorn laddats upp till 3,1 V blev inspänningen 0,808 V. Figur nummer 4 i bilaga 3 är från oscilloskopet för mätningen med 800 lux. Laddningen sker från 1,5 V, på så vis gick laddningen till 1,8 V snabbare än vid 1300 lux. Från 1,5 V till 1,8 V gick det snabbare vid 1300 lux. Med 800 lux tillgänglig tar det ungefär 9 sekunder, medan det tar ungefär 6 sekunder med 1300 lux. Även över 1,8 V tar det längre att ladda kondensatorn till 3,1 V, ungefär 6 sekunder.

Sista mätningen som klarade av att ge tillräckligt mycket energi för att ladda kondensatorn var när ljusstyrkan var 500 lux. Precis som tidigare var spänningen konstant på 0,335 V. Därefter steg spänningen till 0,345 V, och sedan till 0,604 V. Tidsmässigt tog det längst att ladda upp från 1,6 V till 1,8 V, ungefär 16 sekunder. Från 1,8 V till 3,1 V tar det också ungefär 16 sekunder. Figur nummer 5 i bilaga 3 är från oscilloskopet med 500 lux.

Sista mätningen som gjordes var med 300 lux, och i det fallet var det endast tillräckligt för att inte ladda ur kondensatorn men inte heller ladda den. Spänningsnivån låg stabilt på plats under mätningen tills ljusstyrkan ökade. Figur nummer 6 hör till oscilloskopet för mätning med 300 lux.

Mätningstabell:

lux	Spänning V från solpanel	Ström μA	Bild
1300	0,335 V – 0,464 V – 0,903 V	$> 0,01 \mu\text{A}$	3
800	0,335 V – 0,402 V – 0,808 V	$> 0,01 \mu\text{A}$	4
500	0,335 V – 0,345 V – 0,604 V	$> 0,01 \mu\text{A}$	5
300	0,335 V	$> 0,01 \mu\text{A}$	6

Även BAT_OK-utgången mättes för att se om värdena stämde överens med de givna värdena. Figur 1 i bilaga 3 illustrerar när kondensatorn laddar upp från en nivå under 2,4 V. Den blåa linjen blir hög när den röda passerar 2,8 V. Vartefter den röda sjunker under 2,8 V och den blåa signalen hålls hög. Figur 2 i bilaga 3 visar när den röda linjen är under 2,8 V men den blåa signalen hålls hög. Det syns även när den röda linjen sjunker under 2,4 V och den blåa signalen blir låg. Figur 1 i bilaga 3 visar även ett sågtandat mönster runt 3,1 V. Det är överspänningsskyddet som hindrar kondensatorn att laddas över 3,1 V.

Från mätningen konstaterades att BQ25504 fungerar som den ska. Den klarar av att ladda en kondensator samt håller de värden som angetts. Även med en solpanel avsedd för utomhusbruk klarar den av att få tillräckligt med energi. Även om det är solpanelen som klarar av att ge tillräckligt med energi.

6. Resultat

Att sätta ihop en applikation med WiFi-kommunikation är inte ett problem när det gäller hårdvaran. Alla delar som behövs finns och fungerar med varandra. Dock blir en applikation dyr om den ska fungera en längre tid utan matning. Det finns tre problem som är oberoende av varandra, men som ändå påverkar varandra.

Det första problemet är WiFi-modulernas energikrav vid sändning samt vid modulens viloläge. Energikällan klarar inte av att försörja kretsen med den energi som behövs för att hålla modulen i viloläge. Detta leder till att modulen måste stängas av för att inte tömma batteriet. Det i sin tur leder till att modulen måste koppla in sig på nätet varje gång den skall sända data, vilket tar lång tid jämfört med de andra komponenternas aktivitetstid. Batteriet har endast en begränsad tillgång till energi utan laddning. WiFi-modulerna behöver en stor del av den energin för att sända en längre tid. Det betyder att utan laddning klarar en applikation inte av att fungera en längre tid.

Det andra problemet är batteriernas kapacitet och priset som följer med den kapaciteten. Bra tunnfilmsbatterier är dyra och för att hålla igång en WiFi behövs flera. Det tredje problemet är energikällans effektivitet. En solpanel gjord för att vara inomhus har låg effektivitet, vilket leder till att det tar längre tid att ladda ett batteri.

För sig själva fungerar de komponenter som testades utmärkt, även solpanelen för utomhusbruk som användes inomhus. Det bevisar att energihanteringskretsen är effektiv och att solpaneler har låg tröskel för var de inte ger mycket energi.

7. Diskussion

Konceptet att ha en självdrivande krets med trådlös anslutning är i grund och botten en bra lösning för många olika problem som finns i dagsläget. Men i sådana fall ska sådant som påstås om radiovågors effekt på människa, djur och natur ignoreras. En annan aspekt att ta i beaktande är att många av de tekniker som krävs för en sådan lösning endast är i ett tidigt utvecklingskede. Batterierna har minskat i storlek och behåller någon form av effektivitet, kondensatorerna får allt lägre och lägre självurladdning, microprocessorerna blir mindre och effektivare både vad det gäller energiåtgång och tid det tar att utföra klockcykler. Energihanteringschipen som kommit under senare år är unga men visar god utveckling inom området.

Flaskhalsen kommer vid energimatningen och i det här fallet vid WiFi-delen. Trådlös kommunikation med WiFi kräver mycket energi, vilket batterierna nog klarar av men inte under en längre tid till ett rimligt pris. Eftersom tunnfilmsbatterier är tunna kan de fysiskt läggas på varandra för att öka effektiviteten - utan större bekymmer för utrymmet. Det i sin tur innebär i dagsläget ett mycket högre pris samt problemet att matningen inte är speciellt effektiv att ladda batterierna snabbt. Det finns risk att batterierna inte laddas fulla och kan laddas ur helt om ordentlig laddning inte sker.

Solpaneler för utomhusbruk kan ge kretsen den energi den behöver så länge som solpanelerna är utomhus och får det solljus de behöver, så för en utomhusapplikation är det fullt möjligt att ha WiFi-moduler som går i viloläge och inte stängs av. Problemet med batterikostnaderna kvarstår dock.

Framsteg sker dock inom WiFi-kommunikationsteknologin, energikraven för WiFi-chip har sjunkit kraftigt och inom några år kommer kraven att sjunka ytterligare. Även inom den förnyelsebara energiteknologin sker framsteg hela tiden – energikällorna blir effektivare och effektivare.

8. Slutsatser och rekommendationer

En trådlös applikation med WiFi är möjlig att tillverka men två problem uppkommer, antingen priset eller funktionstiden utan laddning. Båda problemen är på grund av batteriet. Priset ökar om längre funktionstid utan laddning önskas, på grund av att fler batterier krävs. Alternativt lämnas batterier bort medan funktionstiden utan laddning minskar. Olika former av matning kan användas men kapaciteten varierar mellan dem. Det beror dock på funktionen och vad det är för miljö applikationen skall befinna sig i.

I väntan på energisnålare WiFi kan andra tekniker för trådlös kommunikation tillsvidare användas för applikationer som ska vara trådlösa. Tunnsfilmsbatterier är närmast den ideala lösningen för ett projekt som detta: Dock är tekniken i ett tidigt skede, effektivitet kostar mycket. Kondensatorer kan användas i stället för batterier. De har dock kvar sin höga självurladdning som till batterier är relativt hög. Dessutom blir en stor del av den lagrade energin oanvänd. Även om en boostconverter används blir en del energi oanvänd.

Energihanteringstekniken är något som det lönar sig att satsa på. Den kommer bara att bli effektivare och förhoppningsvis billigare. Dessutom finns det – i dagens läge - inga andra alternativ som kan jämföras med de chip som finns tillgängliga. Varken storleksmässigt eller effektivitetsmässigt.

För att få en självdrivande sensor med WiFi till ett vettigt pris kan det ta ett antal år för att få tillgång till batterier med vettigt pris samt WiFi-teknologi som inte kräver mycket energi, alternativt en mycket effektiv förnyelsebar energikälla. Dessa är förmodligen alla på kommande, vilket gör ännu effektivare självdrivande applikationer. Det gäller inte endast WiFi utan även till exempel mobiltelefoner, bärbara datorer och säkerhetssystem.

Källförteckning

Aries Benjamin. *How does Piezoelectricity create electricity?*(u.å)

http://www.ehow.com/how-does_5212433_piezoelectric-energy-create-electricity_.html

(hämtat: 19.4.2013)

Brain Marshall & Bryant Charles W. *How capacitors work* (u.å)

<http://www.howstuffworks.com/capacitor.htm> (hämtat: 15.4.2013)

Brain Marshall & Bryant Charles W. & Pumphrey Clint. *How batteries work* (u.å)

<http://electronics.howstuffworks.com/everyday-tech/battery.htm> (hämtat: 9.4.2013)

BQ25504 datasheet (2012)

<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25504.pdf> (hämtat: 9.5.2013)

Fisher Barry (2012). *How much energy a smartphone uses per year (And what it means for your budget)*

<http://lifelifehacker.com/5948075/how-much-energy-a-smartphone-uses-in-a-year-and-what-it-means-for-your-budget> (hämtat: 17.4.2013)

How does a photovoltaic solar cell work? (u.å).

<http://www.cea.fr/var/cea/storage/static/gb/library/Clefs50/pdf/encadred.pdf>

(hämtat: 6.2.2013)

How solar energy works (u.å)

http://www.ucsusa.org/clean_energy/our-energy-choices/renewable-energy/how-solar-energy-works.html (hämtat: 19.4.2013)

Importance of energy storage (2012)

<http://investeddevelopment.com/blog/2012/12/the-importance-of-energy-storage/> (hämtat: 9.5.2012)

Knier Gil (2002). *How do photovoltaics work?*

<http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/solarcells/> (hämtat: 6.2.2013)

Ostaffe Harry. *Energy Harvesting Technology*. (u.å).

http://fi.mouser.com/applications/rf_energy_harvesting/ (hämtat: 2.4.2013)

Pentland William (2011). *Top 26 Stealth Home energy hogs*.

<http://www.forbes.com/sites/williampentland/2011/09/03/top-26-home-energy-hogs-turned-off/> (hämtat: 17.4.2013)

Pyroelectricity (u.å)

<http://www.gdp.if.pwr.wroc.pl/pliki/pyroelectric-effect.pdf> (hämtat: 5.4.2013)

Supercapacitor. (u.å)

http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor (hämtat: 26.4.2013)

Thermoelectrics (u.å)

<http://www.its.caltech.edu/~jsnyder/thermoelectrics/index.html> (hämtat: 5.4.2013)

UNIROSS Study on the environmental impact of rechargeable batteries. 2007

<http://www.batterylogic.co.uk/docs/UNIROSS-Environmental-impact-of-batteries.pdf> (hämtat: 22.4.2013)

Vignati, S. (2012), *Solutions for Indoor Light Energy Harvesting*. Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.

Woodford Chris (2012). *Piezoelectricity*.

<http://www.explainthatstuff.com/piezoelectricity.html> (hämtat: 17.2.2013)

Bilagor

Bilaga 1: Komponenter och uträkningar

Bilaga 2: Kondensatorkod samt kurvor

Bilaga 3: Mättningsresultat

Bilaga 1

Wifi

Modul	Leverantör	Kod	Spänning	Ström	SPI	802.11 n	USB	Viloström	Off(standby)
	Econias	ECS32SXX	+3,3 V DC	Max 200 mA	Ja	ja	ja	2-5 mA	5 μ A
	GainSpan	GS1011M	+3,3 V DC		Ja	ja	nej		7 μ A
	Redpine Signals	RS9110-N-11-02	+3,1 - 3,6 V		Ja	ja	nej		
	RTX	RTX4100_IN	+3,5 V	Max 300 mA	Ja	ja	nej	0,76 - 2,6 mA	2,7 μ A

Chip

	broadcom	BCM4329				ja		
	broadcom	BCM94703NR				ja		
	nanoradio	NRG731				ja		

Solcell

Energi samlare	Leverantör		Spänning	Ström	Mått (mm)	
Solar	CYMBET	CBC-PV-01	1,2 V	201 µA	58,1x56,7x1,1	indoor
Solar	kaxidy	No. 10569	4,5 V	45 mA	105x69x3	outdoor
Solar	kaxidy	No. 9070	4,0 V	45 mA	90x70x3	outdoor
Solar	Shenzhen QF Solar Technology Ltd	QF-3722	4,5 V	5 mA	37x22x1,1	outdoor
Solar	GreenerEnergy	Flexible Solar Panels				outdoor
Solar	Mars Rock Science		5,3 – 7,0 V	11,5 – 14,5 mA	91x33x1,1	outdoor
Solar	Sanyo semiconductor	AM-1815	3 V	42 µA	58,1x46,4x1,3	indoor

Sensor

Sensor	Leverantör	Kod	Spänning	Ström	Uppvärmningstid	Uppvärmingsström
CO	Figaro	TGS 2442	+ 5 V DC	204 mA max	1 s	203 mA
CO2	Leverantör	Kod	Spänning	Ström	Uppvärmningstid	Uppvärmingsström
	SST		+ 3,3 V DC	33 mA	-	-
	co2meter	COZIR	+ 3,3 V DC	33 mA	3 s	
Humidity	Leverantör	Kod	Spänning	Ström		
	Honeywell	HH-5030	+ 2,7 - 5,5 V DC	200 µA		
	HopeRF	HH10D	+ 2,7 - 3,3 V DC	180 µA max		
Hum and Temp	Leverantör	Kod	Spänning	Ström		
	Silicon Labs	Si7005	+ 2,1 - 3,6 V DC			
	Sensirion	SHT1x	+ 2,4 - 5,5 V DC			
	Maxdetect	RHT04	+ 3,3 - 6 V DC	1,5 mA max		
Light	Leverantör	Kod	Spänning	Ström		
	intersil	ISL29020	+ 2,25 - 3,3 V DC	65 µA max		
	silica	MAX9635	+ 1,7 - 3,6 V DC	0,65 µA		
Temperature	Leverantör	Kod	Spänning	Ström		
	Honeywell	HEL-777-A-U-0		2 mA max		
	NXP	KTY81 - KTY84				
	ST	STLM	5,5 V max	8µA max		
CO2+Temp+Hum						
	SST+sensirion		+3,3 V DC			

Energj

Linear Technology	LTC4071	För li/ion och polymer batterier
Maxim	MAX17710	Mer som en processor, programmerad med förinställningar
Texas Instruments	BQ25504	Mångsidig, programmerbara trösklar. Kan använda olika lagringenheter.
Cymbet EnerChip	CBC915	För batterier, delvis programmerbar med dator

Komponentenval

Solcell:	CYMBET	1,2 V DC	201 μ A
Batteri:	Thinergy	4 V DC	2,2 mAh
MCU:	Texas Instruments	3,3 V DC	270 μ A
Sensor:	ST	5,5 V max	8 μ A max
WiFi:	Econias	+3,3 V DC	Max 200 mA
	RTX	+3,5 V DC	Max 300 mA
PMIC:	Texas Instruments		
	BQ25504		

Uträkningar

Ström konsumtion för de olika skedena i en period samt tid för perioden och beräknad energi åtgång.				
econias	ECS32SXX	+3,3 V DC	max 200mA	Wifi modul
strömkonsumtion				
mcu	viloläge	startup	i bruk	
	0,7 μ A	0,7 μ A – 270 μ A	270 μ A	
wifi	5 μ A	5 μ A – 200 mA	200 mA	
sensor	0 μ A	0 – 4,8 μ A	4,8 μ A	
totalt	5,7 μ A	5,7 μ A – 200,27 mA	200,275 mA	
tid				
mcu	viloläge	startup	i bruk	
	599,998999 s	1 μ S	1 ms	
wifi	594,5 s	0,5 s	5 s	
sensor	599,4995 s	0,5 s	500 μ s	
energi				
mcu	viloläge	startup	i bruk	
	0,0014 J	4e-10 J	9e-7 J	
wifi	0,0098 J	0,165008 J	3,30 J	
sensor	0 J	4e-6 J	7,9e-9 J	
totalt	0,0112 J	0,165012 J	3,3 J	Totalt för cykeln
				3,47 J

Uträkningar

RTX	RTX4100_IN	+3,5 V DC	Max 300 mA	Wifi modul
strömkonsumtion	viloläge	startup	i bruk	
mcu	0,7 μ A	0,7 μ A – 270 μ A	270 μ A	
wifi	4 μ A	4 μ A – 300 mA	300 mA	
sensor	0 μ A	0 μ A – 4,8 μ A	4,8 μ A	
Totalt	4,7 μ A	4,7 μ A – 300,7 mA	300,275 mA	
tid	viloläge	startup	i bruk	
mcu	599,998999 s	1 μ S	1 ms	
wifi	594,5 s	0,5 s	5 s	
sensor	599,4995 s		500 μ s	
energi	viloläge	0,5 s	i bruk	
mcu	0,0014 J	5e-11 J	9e-7 J	
wifi	0,0083 J	0,262509 J	5,25 J	
sensor	0 J	0,000004 J	8,4e-9 J	
Totalt	0,0097 J	0,262513 J	5,25 J	Totalt för cykeln 5,52 J

wifi	Energi	
Econias ECS32SXX	3,47	Joule / cykel
RTX RTX4100_IN	5,52	Joule / cykel

Uträkningar

Uträkning hur mycket energi CYMBET CBC050-M8C-TR1 3,8 V 50 μ Ah kan lagra

Batteri energi

Kapacitet:	0,0005Ah
Sekunder:	3600S
Spänning:	3,8V
Energi:	6,84J

Formel: Ah * U * T

Kontroll gjord med data från MEC202 batteriet

Kapacitet:	0,0022Ah
Sekunder:	3600S
Spänning:	4V
Energi:	31,68J

Stämmer med databladet för MEC202 batteriet

Databladet anger 31 Joule energikapacitet och uträkningen ger ca 31 Joule i energikapacitet

Annan kontroll:

Batterijämförelse genom förhållande

CBC050 / MEC202 Spännings förhållande	0,95
CBC050 / MEC202 kapacitets förhållande	0,23
Förhållanden multiplicerade för att få riktigt förhållande MEC202 gånger det uträknade förhållandet	0,22 6,84J

Jämförelserna leder till samma svar
CBC050 tunnfilmsbatteriet har kapacitet till
att lagra 6,84 Joule

Ulträkningar

Strömförbrukning: 5,7 μ A ECS32SXX
4,7 μ A RTX4100_IN

Förbrukningsladdström: 53,13 μ A ECS32SXX
54,13 μ A RTX4100_IN

	antal batterier	Energi / Joule	Laddningstid		Antal cykler utan matning	
			Ingen urladdning / h	Urladdning / h	Vanlig wifi	Wifi tiondel snålare
MEC202						
ECS32S	1	31	37,4	41,41	8,93	89,34
200 mA max	2	62	74,79	82,82	17,87	178,67
3,3 V	3	93	112,19	124,22	26,8	268,01

	antal batterier	Energi / Joule	Laddningstid		Antal cykler utan matning	
			Ingen urladdning / h	Urladdning / h	Vanlig wifi	Wifi tiondel snålare
MEC202						
RTX-4100	1	31	37,4	40,64	5,62	56,16
300 mA max	2	62	74,79	81,29	11,23	112,32
3,5 V	3	93	112,19	121,93	16,85	168,48

	antal batterier	Energi / Joule	Laddningstid		Antal cykler utan matning	
			Ingen urladdning / h	Urladdning / h	Vanlig wifi	Wifi tiondel snålare
CBC050						
ECS32S	1	6,84	0,85	1,17	1,97	19,71
200 mA max	2	13,68	1,7	2,33	3,94	39,42
3,3 V	3	20,52	2,55	3,5	5,91	59,14

	antal batterier	Energi / Joule	Laddningstid		Antal cykler utan matning	
			Ingen urladdning / h	Urladdning / h	Vanlig wifi	Wifi tiondel snålare
CBC050						
RTX-4100	1	6,84	0,85	1,17	1,24	12,39
300 mA max	2	13,68	1,7	2,33	2,48	24,78
3,5 V	3	20,52	2,55	3,5	3,72	37,17

Ultråkrningar

Kapacitansen räknas ut för en stödkondensator. Stödkondensatorns uppgift är att förse kretsen med den mängd ström som batteriet inte klarar av att ge ut

Kapacitans:

Formel:

$$C = t / R * (-\ln (V_{\min}/V_{\max}))$$

tid för puls / s	Uout / V	I pulse / A	R / ohm	Umin / V	Umax / V	C / F
5	3,3	0,2	16,5	3,3	3,3	4 1,58
5	3,5	0,3	11,67	3,5	3,5	4 3,21

tid för puls / s	Uout / V	I pulse / A	R / ohm	Umin / V	Umax / V	C / F
5	3,3	0,2	16,5	3,3	3,3	3,8 2,15
5	3,5	0,3	11,67	3,5	3,5	3,8 5,21

MEC stödkondensatorer:

1,58 F ECS32SXX
3,21 F RTX4100_IN

CBC stödkondensatorer:

2,15 F ECS32SXX
5,21 F RTX4100_IN

Formel:

$$t = R * C * (-\ln(1 - V_{\min}/V_{\max}))$$

Laddningstid:

MEC stödkondensatorer:

Resistans / Ohm	Kondensator / F	Vmin / U	Vmax / U	Laddningstid / s
18	1,58	3,3	4	49,57
18	3,21	3,5	4	120,15

CBC stödkondensatorer:

Resistans / Ohm	Kondensator / F	Vmin / U	Vmax / U	Laddningstid / s
18	2,15	3,3	3,8	78,49
18	5,21	3,5	3,8	238,1

Laddningstid:

1,58 F 59,57 s
2,15 F 78,49 s
3,21 F 123,52 s
5,21 F 238,1 s

Komponent uträkningar

Komponenter för att programmera PMIC:en är resistorerna

Första tabellen innehåller de komponenter som finns i databladet.

Den vänstra kolumnen innehåller de komponenter som finns i kretsen, till höger deras värden.

Kapacitörerna och spolen används inte i programmerings syfte utan har andra syften.

Resistorer		Ohm
	Roc1	15,62 M
	Roc2	4,44 M
	Rok1	4,42 M
	Rok2	4,22 M
	Rok3	1,43 M
	Ruv1	5,6 M
	Ruv2	4,42 M
	Rov1	5,9 M
	Rov2	4,02 M
Kapacitörer		C / F
	Chvr	4,7 μ
	Cstor	4,7 μ
	Cbat	
	Cref	0,01 μ
Induktans		L / H
	Lbst	22 μ

Komponent uträkningar

Uträknade komponentvärden för CBC050 batteriet

Värden under Mål tabellen är de värden användaren/programmeraren ska ha för gränsvärdena Under voltage, Over voltage, V_bat_ok och V_bat_ok_hyst. Räknat värde tabellen är de värden som räknats ut med resistanser som finns tillgängliga på marknaden. Resistanserna är i Resistanser tabellen, vilken resistans det motsvarar i kretsen finns till höger om deras värdena.

	Mål	Räknat värde	Resistanser	
	0,8	0,79	15,6 MΩ	Roc1
Under voltage	3 V	2,96 V	8 MΩ	Roc2
Over voltage	3,85 V	3,85 V	3,4 MΩ	Rok1
V_bat_ok	3,5 V	3,46 V	6 MΩ	Rok2
V_bat_ok_hyst	3,6 V	3,64 V	500 kΩ	Rok3
			4,2 MΩ	Ruv1
			5,75 MΩ	Ruv2
			4,8 MΩ	Rov1
			5 MΩ	Rov2

Bilaga 2

```

% tidsvektorer i sekunder
tid = 0:0.1:200;
tid2 = 0:0.1:250;

% batteriets resistans
R = 18;

F1 = 1.58; % Första kondensatorns kapacitans i Farad
F2 = 3.21; % andra kondensatorns kapacitans i Farad

Vmax = 3.96; % 5 tau, 99% av totala laddningen, antas vara laddat
Vinit1 = 3.3; % Första kondensatorns lägsta tillåtna spänning
Vinit2 = 3.5; % Andra kondensatorns lägsta tillåtna spänning
Vin = 4; % Laddningsspänning

% Laddningstid från Vinit till Vmax i sekunder kondensatorerna

t1 = -R*F1*log((Vmax-Vin)/(Vinit1-Vin)); % Första kondensator
t2 = -R*F2*log((Vmax-Vin)/(Vinit2-Vin)); % Andra kondensator

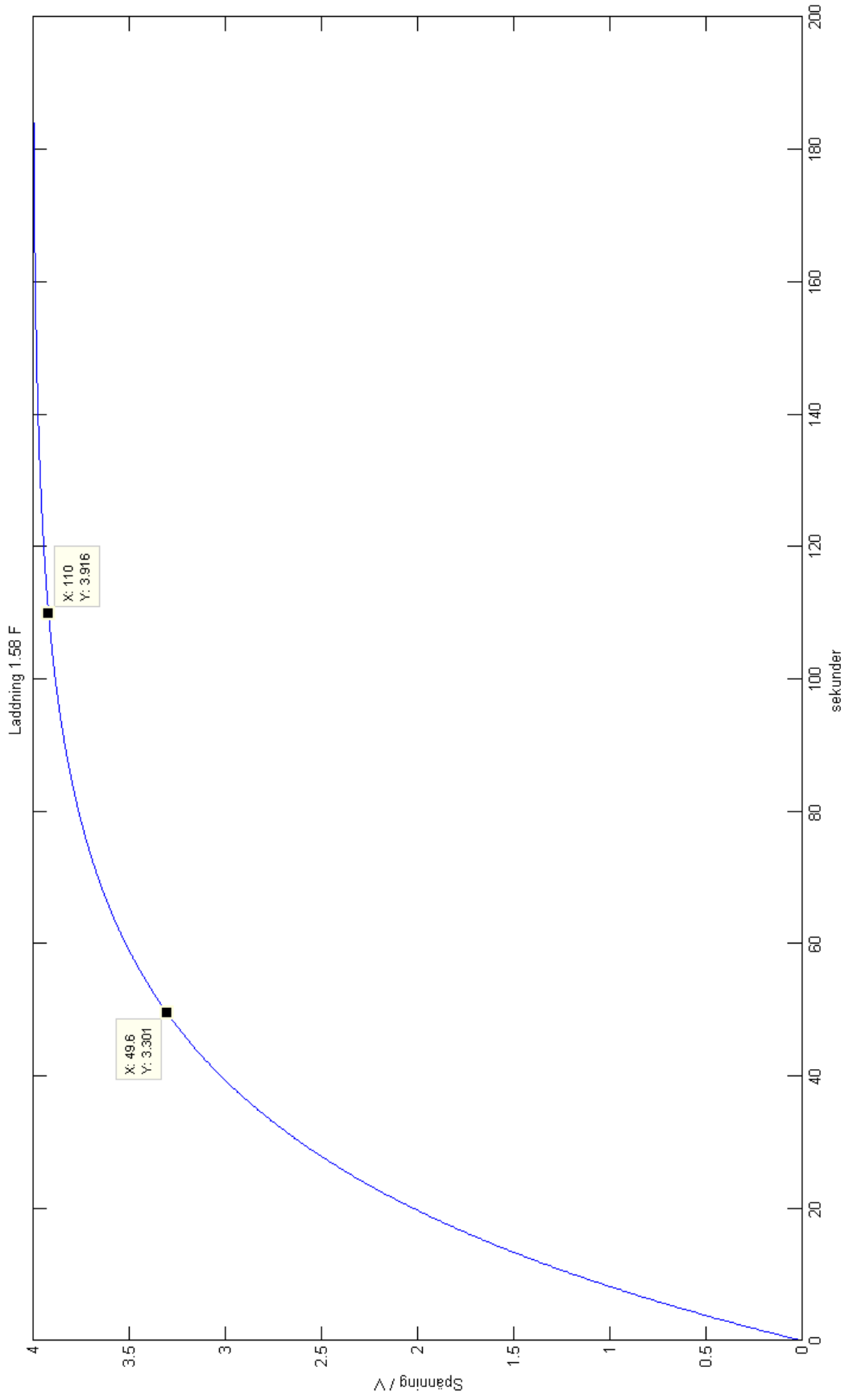
% Laddning av kondensatorerna,
Vladd1 = Vin*(1-exp(-tid/(R*F1))); % Första kondensatorn
Vladd2 = Vin*(1-exp(-tid2/(R*F2))); % Andra kondensatorn

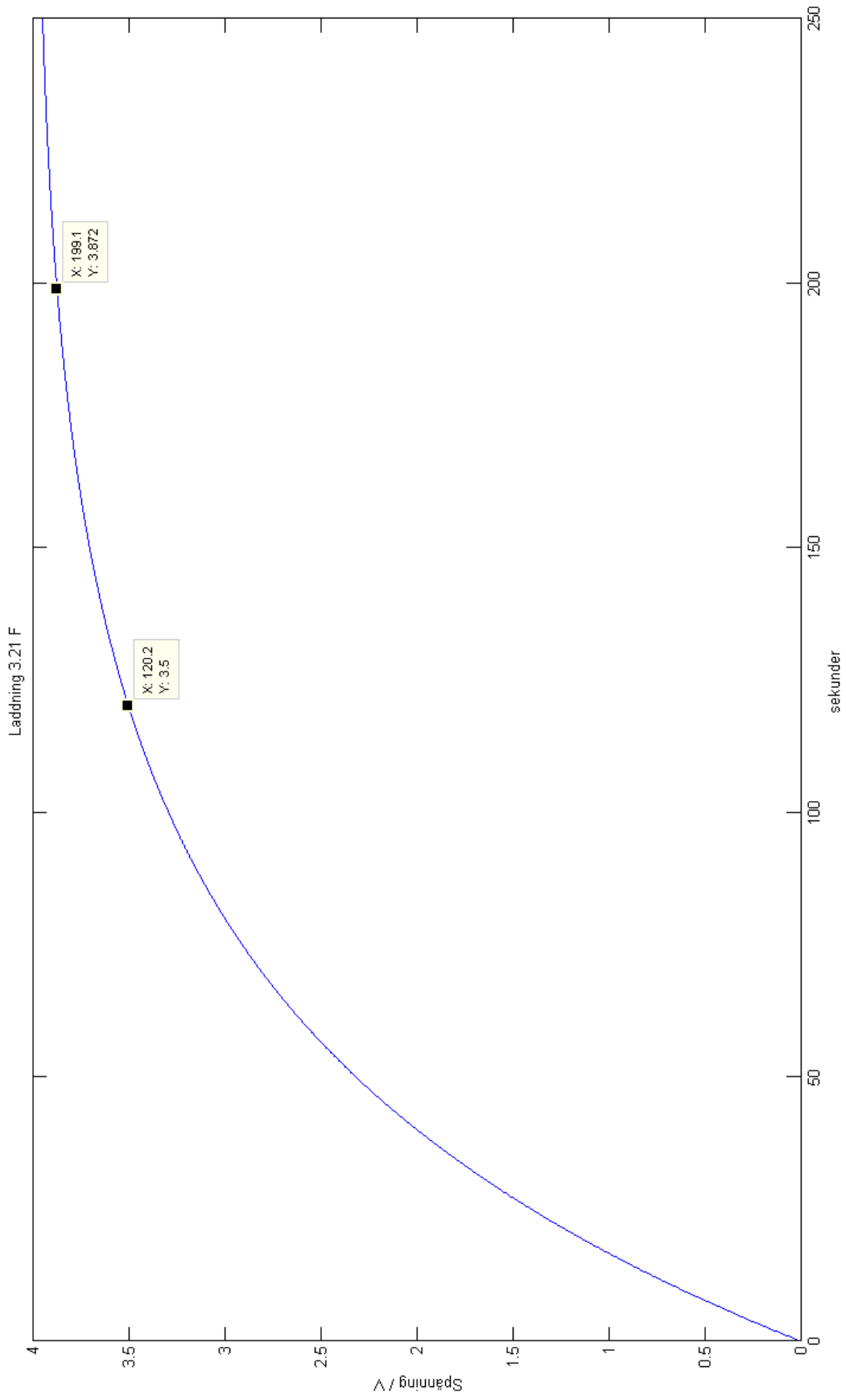
% talet framför F1 och F2 är kretsarnas resistans under den aktiva
% perioden.
Vurladd1 = Vin*exp(-tid/(17.5*F1)); % urladdning för första kondensatorn
Vurladd2 = Vin*exp(-tid2/(12.33*F2)); % urladdning för andra kondensatorn

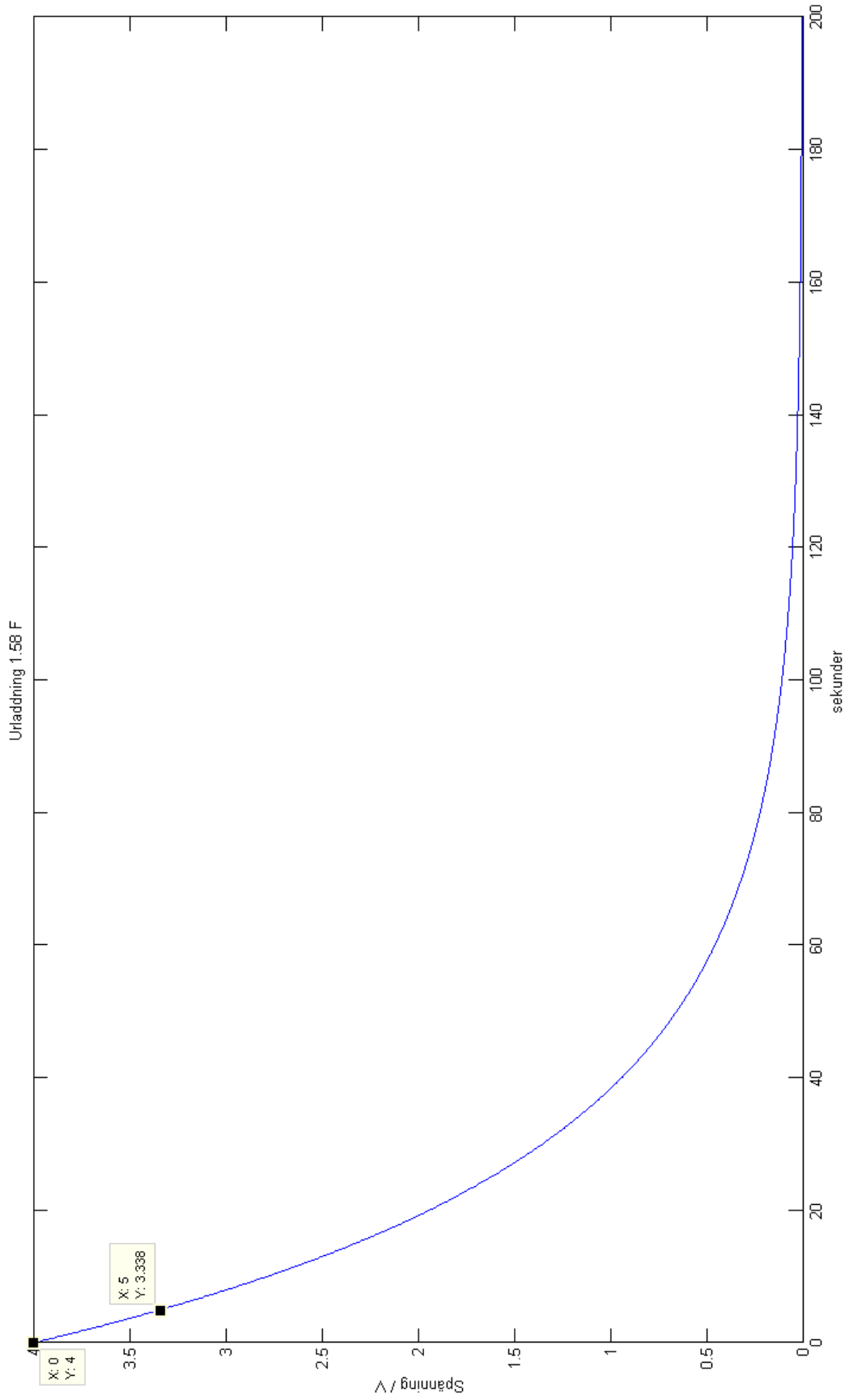
% tau, tidskonstanterna för de båda kondensatorerna. Svaret är i sekunder.
tau1 = 17.5 * F1
tau2 = 12.33 * F2

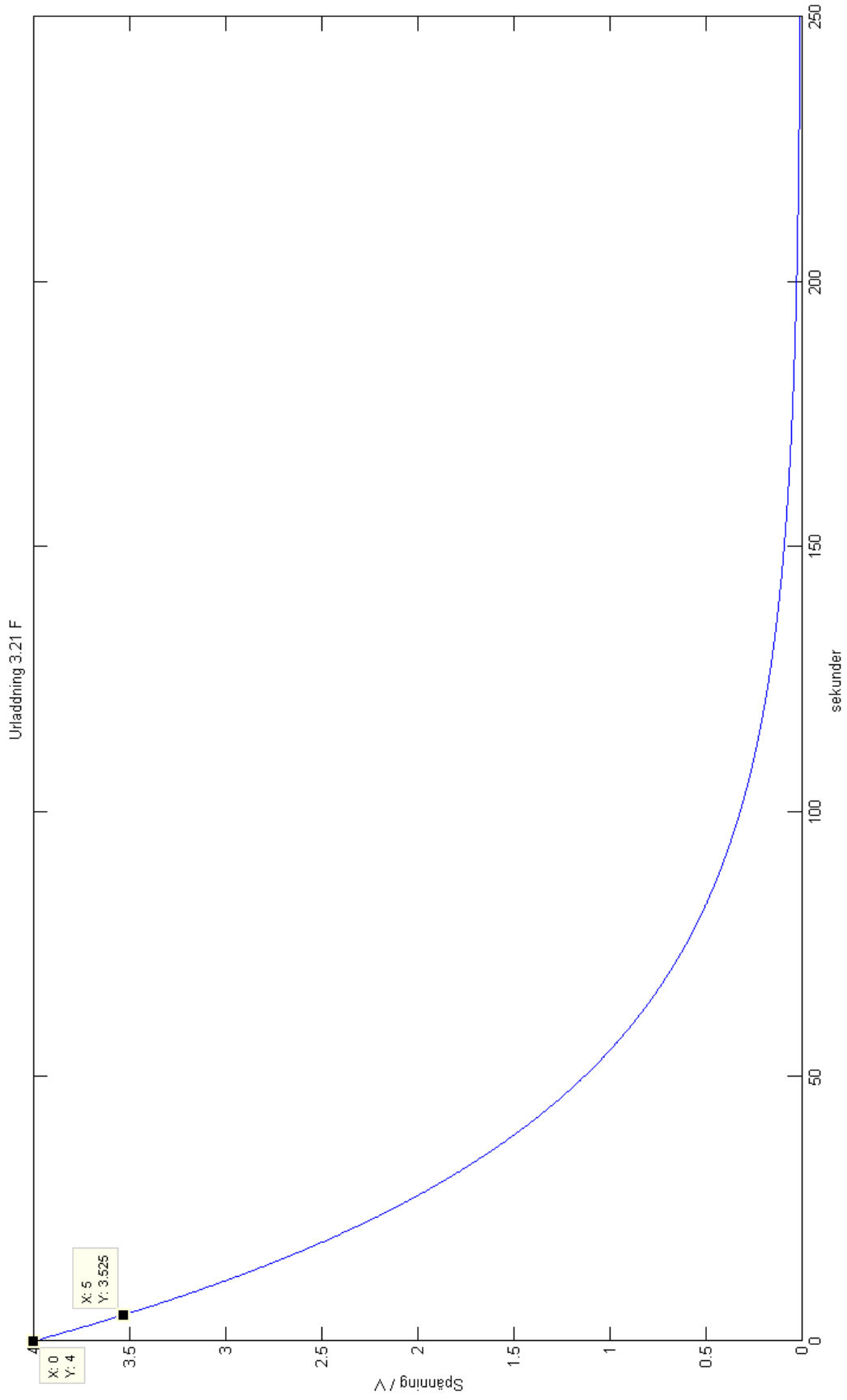
% Laddnings- och urladdningskurvorna för kondensatorerna mot tidsvektorn
% Laddnings- och urladdningskurvorna för kondensatorerna mot tidsvektorn
figure,plot(tid,Vladd1)
title('Laddning 1.58 F');
xlabel('sekunder')
ylabel('Spänning / V')
figure,plot(tid2,Vladd2)
title('Laddning 3.21 F');
xlabel('sekunder')
ylabel('Spänning / V')
figure,plot(tid,Vurladd1)
title('Urladdning 1.58 F');
xlabel('sekunder')
ylabel('Spänning / V')
figure,plot(tid2,Vurladd2)
title('Urladdning 3.21 F');
xlabel('sekunder')
ylabel('Spänning / V')

```

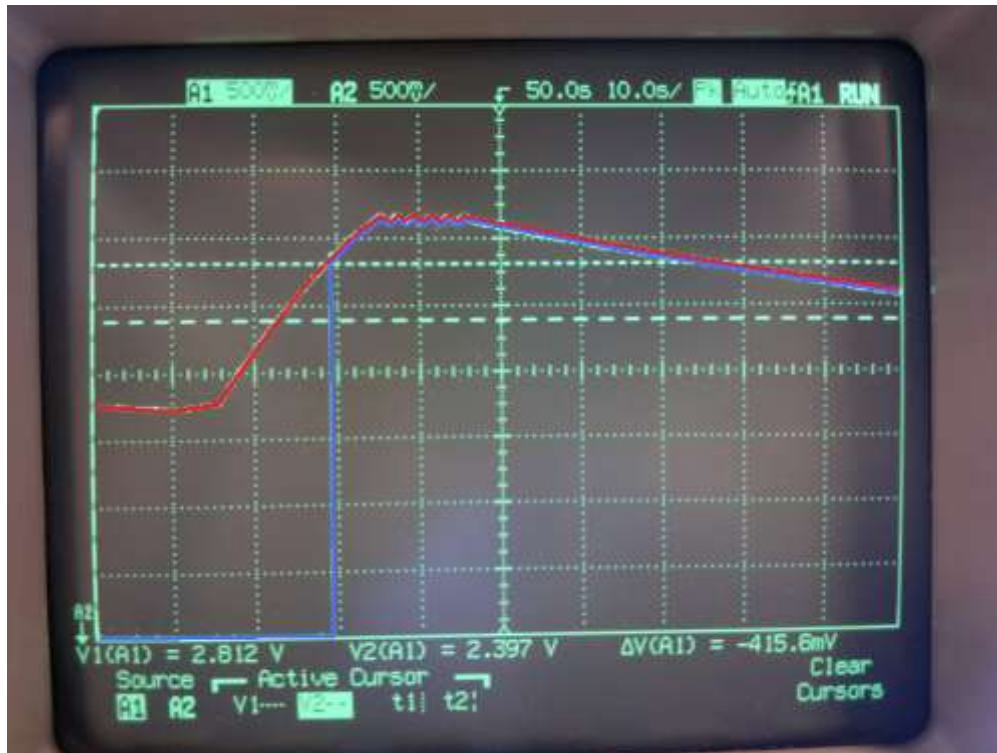




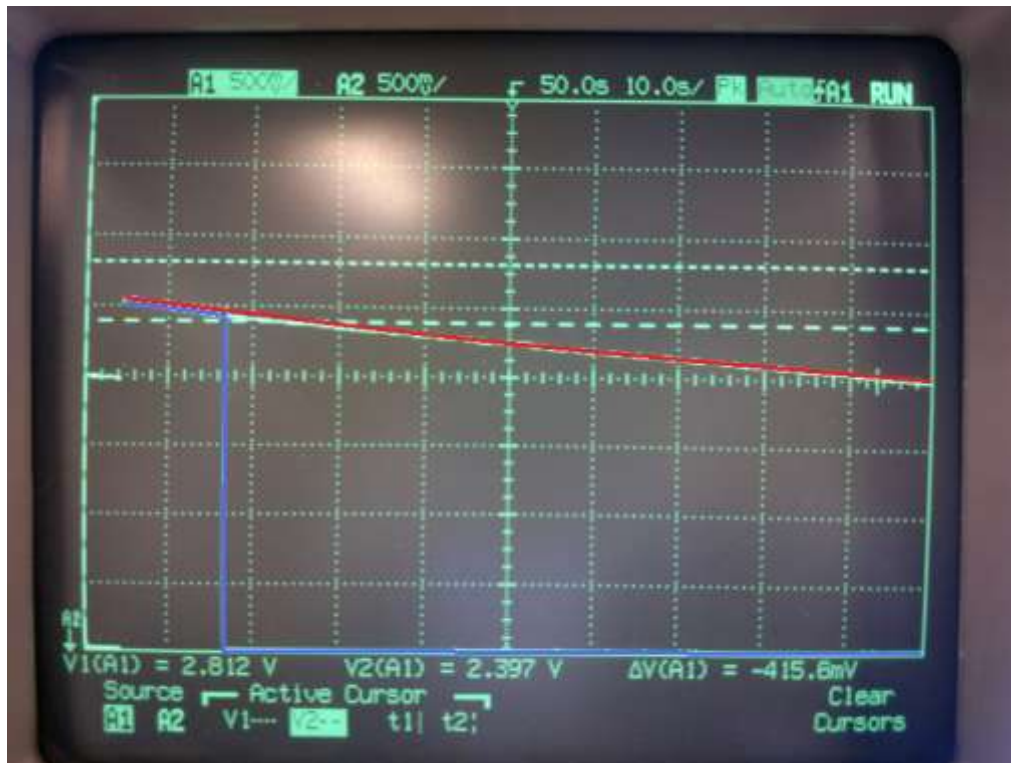




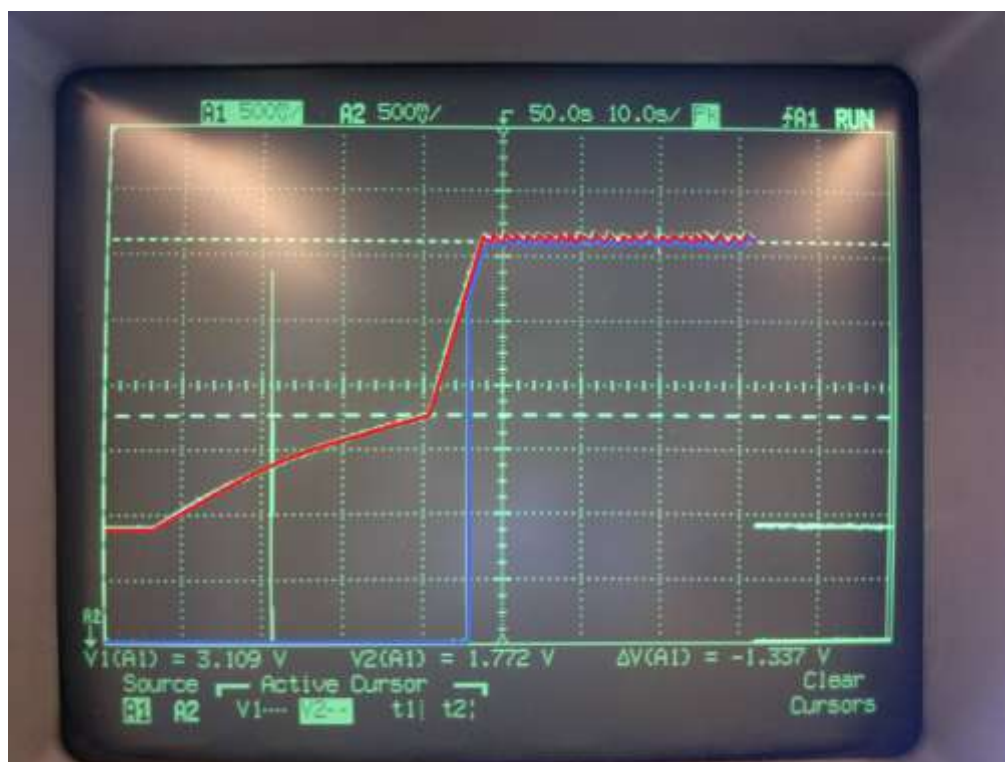
Bilaga 3



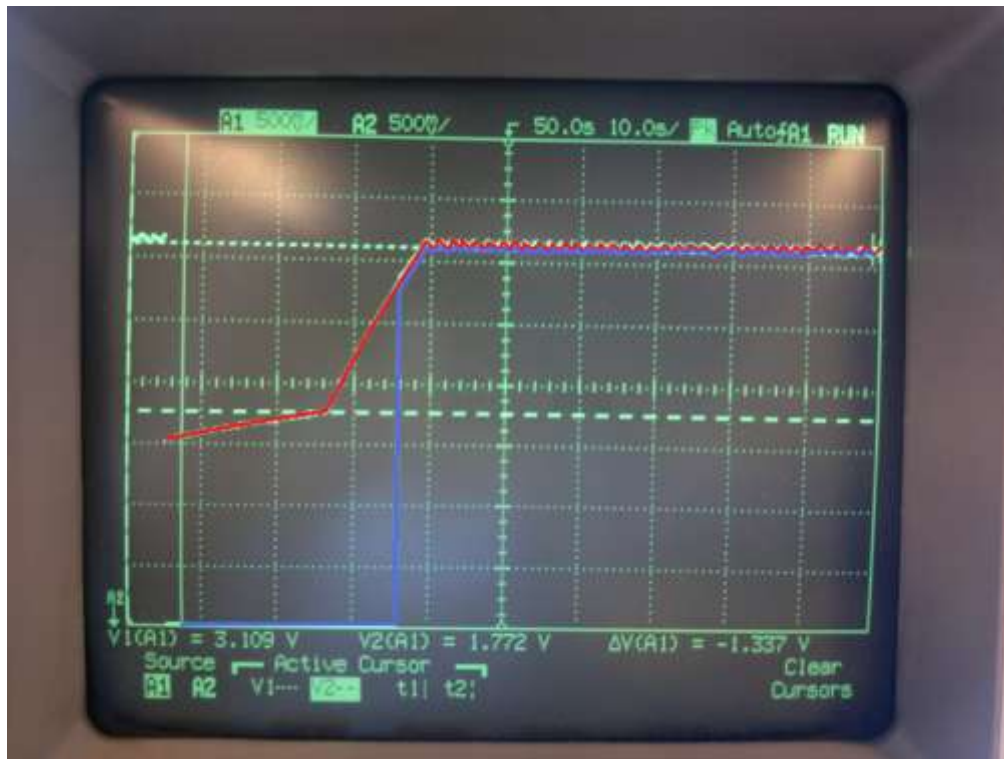
Figur 1: Battery_OK-signal hög.



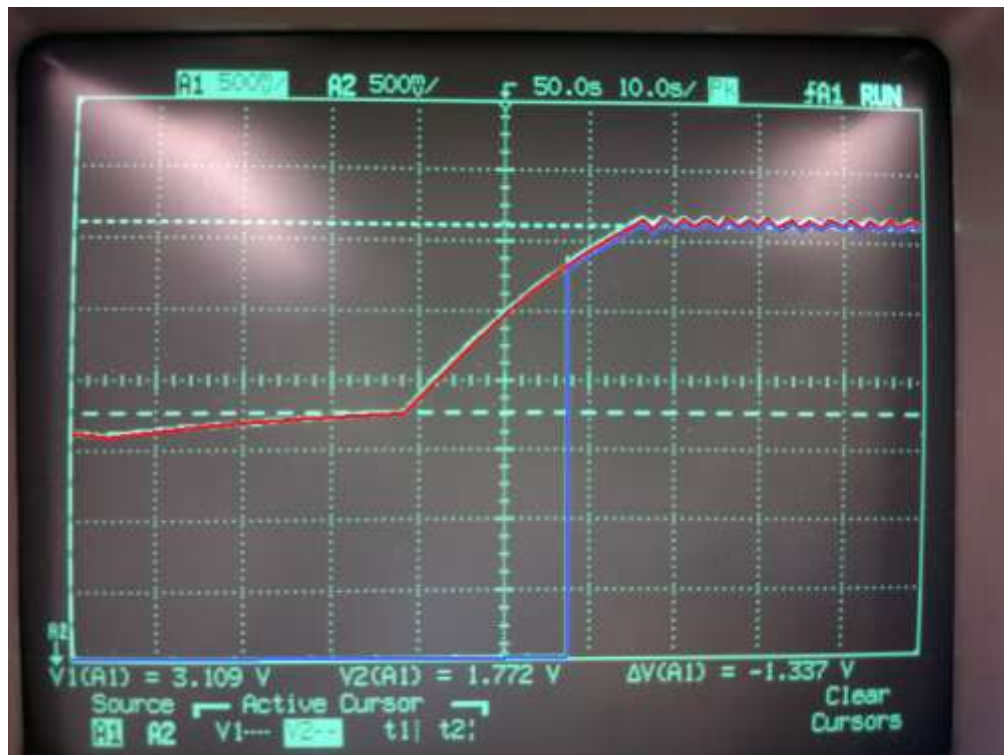
Figur 2: Battery_OK-signal låg.



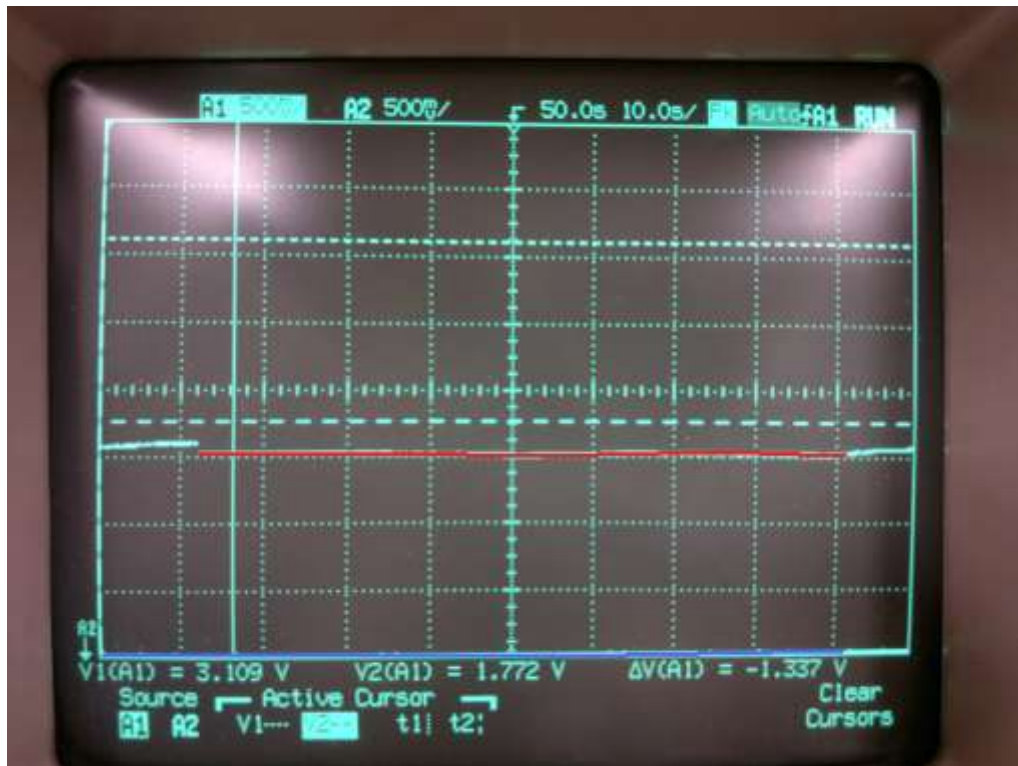
Figur 3: Kondensatorladdning vid 1300 LUX.



Figur 4: Kondensatorladdning vid 800 LUX.



Figur 5: Kondensatorladdning vid 500 LUX.



Figur 6: Kondensatorladdning vid 300 LUX.