

KANDIDATARBETE

Superkondensatorer istället för batterier som energireserv i lågvoltssystem.

Högskoleingenjör i elektronik och Teknologie kandidat i elektroteknik.

Liv Lundmark Fadi Eliasson
livlu296@student.liu.se fadel497@student.liu.se

Sammanfattning

Efter given specifikation konstrueras en energireserv av superkondensatorer. PCB görs i mjukvarorna OrCAD Capture och Altium Designer. Simuleringar görs i Matlab samt LTSpice. Den färdiga prototypen testas i klimatkammare för att bestämma förväntad livslängd. Nödvändig teori, tidigare forskning samt slutsats presenteras.

Abstract

This report examines if supercapacitors could replace the existing batteries used in a product as a power source. Gathering of sources, literature and material as theory. Simulations were performed to verify choices for the circuit. The circuit was then created, using OrCad and Altium Designer, and tested. The theory, simulations and tests all pointed towards that indeed supercapacitors can replace the existing batteries and the requirements can be met. Future tests are needed to fully verify if the solution can withstand the time and temperature requirements.

Förord

Rapporten är en del i examensarbetet på 16 poäng vid Linköpings universitet. Arbetet utfördes under våren och sommaren 2019. Uppdragsgivaren är Actia Nordic AB i Linköping.

Tack

Vi vill rikta ett särskilt tack till *Tomas Westlund*, uppdragsgivaren från Actia samt *Per Järmark* från ÅF som förmedlade kontakten.

Vi vill rikta ett stort tack till *Andrejs Bondarevs*, vår handledare hos Actia för all hjälp under arbetets gång. Utan Andrejs hade detta arbete ej blivit av då det var han som tipsade Tomas om superkondensatorer som en möjlig lösning.

Vi vill även tacka *Jonatan Gezelius* samt *Torgny Nilsson* för hjälp med simuleringarna i LTSpice.

Tack *Leif Salomonsson* och *Gustaf Lindström* för hjälp med material samt labbutrustning samt *Urban Axelsson* för tillhanda hållandet av mekanik underlag.

Innehållsförteckning

1	Inledning	1
1.1	Syfte	1
1.2	Frågeställning	1
1.3	Specifikation av systemet	1
1.4	Avgränsningar	2
1.5	Rapportens struktur	2
2	Teori	3
2.1	Batteriet	3
2.2	Statisk elektricitet	4
2.3	Kondensator	4
2.3.1	Elektrolytkondensatorn	5
2.4	Superkondensatorn	7
2.4.1	Elektriskt dubbelskikt	7
2.4.2	Kapsling	8
2.4.3	Superkondensatorns elektrolyt	8
2.4.4	Kapacitans	9
2.4.5	ESR	10
2.5	Livslängd	11
2.5.1	Arrheniusekvationen	11
2.5.2	Förväntad livslängd	11
2.5.3	Temperatur	12
2.5.4	Derating	12
2.5.5	Spänningsbalansering av superkondensatorcell	12
2.6	Test	13
2.6.1	Calendric lifetime testing	13
2.6.2	Cyclic testing	13
2.6.3	Temperatur	13
2.6.4	Temperaturprofil	13
2.6.5	Läckström	13
2.7	Modell	14

2.7.1	Tregrens modell	14
2.7.2	Förenklad modell	15
2.7.3	Matlab	15
2.8	Val av leverantör	15
3	Metod	16
3.1	Litteraturstudie	16
3.1.1	Sökord	16
3.1.2	Litteraturbas	17
3.2	Simulering	17
3.3	PCB	17
3.4	Test	18
3.4.1	Material	18
3.4.2	Mätning av ESR och kapacitans .	19
3.4.3	Livslängd	20
3.4.4	Effektkrav	21
3.4.5	Övriga mätningar	22
4	Resultat	23
4.1	Konstruktion av krets	23
4.1.1	Kretsschema	23
4.1.2	PCB	23
4.1.3	Färdig krets	24
4.2	Test	25
4.2.1	Kretsar	25
4.2.2	Kapacitans	26
4.2.3	ESR	28
4.2.4	Livslängdtest	30
4.2.5	Effektkrav 3	33
4.3	Balansering av krets	34
4.3.1	Simulering	34
4.3.2	Mätningar	35
5	Diskussion	38
5.1	Metod	38
5.2	Konstruktion av krets	38
5.2.1	PCB	38
5.2.2	Lödning	39
5.2.3	Simulering	39
5.3	Test	39

5.3.1	Balansering	39
5.3.2	Kapacitans mätning	39
5.3.3	ESR mätning	39
5.3.4	Effektkrav 3	39
5.3.5	Livslängd	40
5.3.6	Sampling	40
5.3.7	Källkritik	40
6	Slutsats	41
6.1	Framtida arbete	41
6.2	Sammanfattning	41
A	Appendix	45
A.1	Agilent 34401A logger (RS-232)	46
A.2	Agilent 34401A logger (GPIB, Adress 21)	47
A.3	Python Uppladdnings skript	48
A.4	Python Effekt-last skript	49
A.5	KEITHLEY 2015 THD logger (RS-232)	50
A.6	Matlab plot log	52

1

Inledning

Traditionellt sett har batterier använts som energireserv i elektriska system. Nackdelen med batterier är att de behöver bytas ut flertalet gånger under ett systems livstid. Detta har negativa konsekvenser både på miljö men även på kundnöjdhet. Ett inbyggt batteri är ingenting som kunden kan byta själv utan denne måste få hjälp med detta, vilket kan upplevas som ett besvärligt moment ur både ett tids samt ekonomiskt perspektiv. Det hade varit fördelaktigare om superkondensatorer, som har längre livslängd, hade kunnat ersätta det inbyggda batteriet i produkten för att på så sätt undkomma behovet av batteribyte. Specifikationen [1.1] innehåller kraven som måste vara uppfyllda för att kretsen ska kunna ersätta batteripacket i den befintliga produkten. Livslängdskravet på 15 år anses vara det svåraste att uppfylla, en teori som ska undersökas är om livlängden kan förlängas via reduktion av den nominella spänningen över den enskilda superkondensatorn.

1.1 Syfte

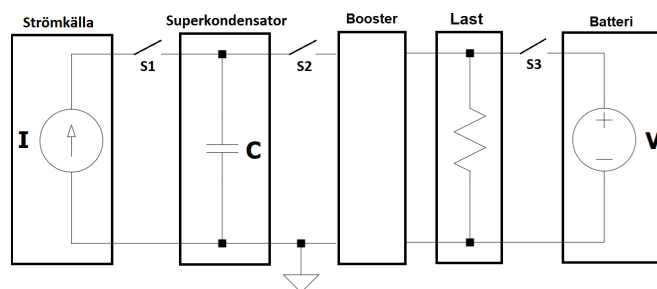
Syftet med kandidatarbetet är att undersöka om superkondensatorer kan ersätta en befintlig energikälla som reservkraft i en viss applikation.

1.2 Frågeställning

1. Kan livslängden för superkondensatorer som används i ett likströmssystem, som reservkraft uppgå till 15 år?
2. Om 15 års livslängd kan uppnås, kan de övriga kraven i specifikationen (tabell 1.1) uppfyllas?

1.3 Specifikation av systemet

Energireservkretsen sitter i ett system som har ett batteri som primär energikälla. När systemet stängs av behövs extra tid för att avsluta pågående processer och det är då som den extra energikällan behövs. När processerna är avslutade och systemet är avstängt behöver kretsen hålla i gång den interna klockan. Efter kretsen sitter en booster (DC/DC step-up konverterare) som ser till att systemet får 5 V konstant. En förenklad representation av systemet ses i figur 1.1.



Figur 1.1: Systemet består av en strömkälla på 200 mA som laddar upp superkondensatorblocket då switchen S1 är sluten. Under uppladdning är S2 öppen. Kretsen som ska drivas representeras av en last, batteriet representeras av en spänningkälla. När batteriet stängs av öppnas S3 samt sluts S2 och lasten drivs istället av superkondensatorblocket. S1 och S2 samt S1 och S3 kan ej vara slutna samtidigt. Att boostern kan kopplas bort representeras ej i figuren.

Superkondensatorn som ses i figur 1.1 är en modul av flera superkondensatorer.

Specifikation

Temperaturintervall	[-40 85]	C°	Temperaturintervallet för omgivningen som kretsen ska klara.
Livslängd	15	år	2 cykler om dagen, 365 dagar i 15 år (3 skottdagar) = 10956 cykler.
Uppladdningsström	0,2	A	Strömmen som laddar upp superkondensatorerna medan systemet är igång.
Spänning (max)	4,5	V	Vid högre spänning kan ej garanteras att boostern fungerar.
Spänning (min)	2,5	V	Underskrider tröskelvärde klarar ej boostern att leverera 5 V till systemet.
Effektkrav 1	15	W	Under de första 2 sekunderna då systemet slagits av är lasteffekten 15 W.
Effektkrav 2	3	W	Under de följande 30 sekunderna är lasteffekten 3 W.
Effektkrav 3	25μ	W	Efter effektkrav 1 och 2 är lasteffekten 25 μW och denna ska kunna drivas i fyra veckor.

Tabell 1.1: Under effektkrav 3 är ordinarie krets bortkopplad och därmed även boostern, min-kravet på spänningen gäller därför ej under effektkrav 3.

1.4 Avgränsningar

Då examensarbetet ska ersätta en befintlig lösning är in och utsignaler förutbestämt. Storleken på slutprodukten är även begränsad samt strömmen för uppladdning som kan tillhandahållas av kretsen. Val av superkondensator samt leverantör ingår i arbetet.

1.5 Rapportens struktur

Teorikapitlet redovisar all teori som framkom under litteraturstudien. Metod redovisar vald metod samt beräkningar som krävs för att genomföra dessa. Resultat redovisar resultaten/mätvärdena från det som genomfördes i metod. Diskussion diskuterar resultaten samt valda metoder samt ger förslag på hur arbetet kan utvecklas framåt. Slutsats presenterar rapportens slutsatser.

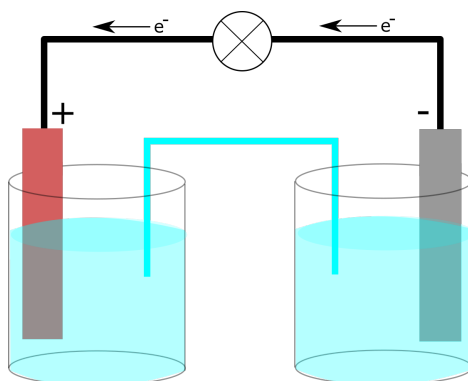
2

Teori

Superkondensatorn är en vidareutveckling av elektrolytkondensatorn [1] som i sin tur upptäcktes i försök att förbättra det laddningsbara batteriet [2]. Därav kommer den grundläggande teorin för batterier, elektrolytkondensatorer samt superkondensatorer att presenteras i detta kapitel. Först kommer batteriet kortfattat presenteras, sedan presenteras statisk elektricitet och uppfinningen som kan lagra denna, kondensatorn följt av elektrolytkondensatorn och till sist superkondensatorn.

2.1 Batteriet

Batteriet som är baserad på kemiska reaktioner kom under 1800-talet [3]. Ett batteri använder oxidation/reduktion för att alstra ström vilket innebär att det är en faradisk process [1]. Under den faradiska processen omvandlas metallen i anoden till lösliga joner medan metallen i katoden får ökad volym då jonerna i batterivätskan binder sig till elektronerna och bildar molekyler [4]. För att undvika en inre potentialskillnad så används en saltbrygga i vilken joner kan avges till anoden respektive katodens jonlösningar för att neutralisera skillnaden i laddning som uppstår när elektronerna avges respektive mottages [5]. Saltbryggan är antingen en remsa indränkt i en lösningen eller en glastub med ledande gel [5].



Figur 2.1: Batteriets uppbyggnad med saltbrygga. [5]

Elektrolyt

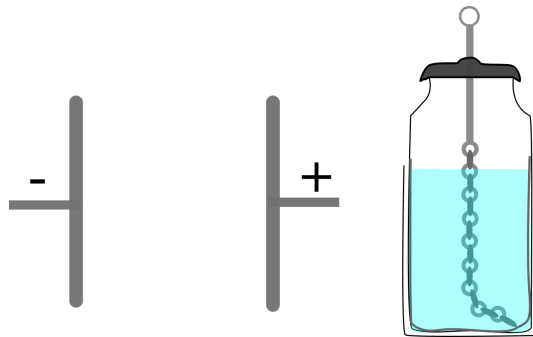
Elektrolyt är en lösning som innehåller fria joner, de positiva (katjoner) och de negativa (anjoner) kan leda elektrisk ström, elektroner, när två elektroder placeras i elektrolyten sker en elektrolys [5].

2.2 Statisk elektricitet

Statisk elektricitet har människan haft vetskap om redan 600 år f.Kr [1]. När ett elektriskt isolerande material får extra elektroner så blir detta negativt laddat [6, kap. 3]. Vid kontakt med ett elektriskt ledande material neutraliseras laddningen då de extra elektronerna avges [6, kap. 3]. Denna obalans av laddning kan uppnås t.ex. via friktion [7].

2.3 Kondensator

Under 1700-talet uppfanns leidenflaskan som kunde lagra den statiska elektriciteten (laddning) [1][3]. Glaset i flaskan var det isolerande materialet och elektroderna av metall på var sida om glaset var det ledande [1]. Funktionsmässigt skiljer den sig inte från en kondensator, som består av två parallella metallplattor med luft eller annat material emellan som isolator [1]. En väsentlig skillnad är att en kondensator går att få i lämplig storlek och är lätt att integrera i elektronik kretsar [1].



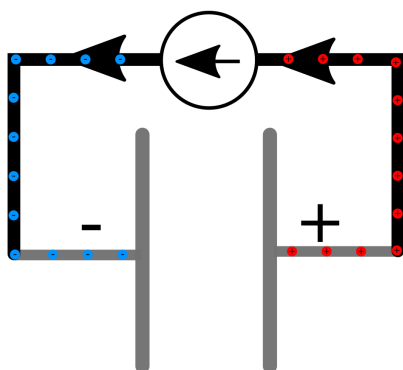
Figur 2.2: Kondensator till vänster, leidenflaskan till höger.

Hur mycket laddning som en kondensator kan lagra kallas för kapacitans och mäts i Farad [1]. 1 Farad är den mängd laddning som behöver tillföras för att potentialskillnaden mellan kondensatorns plattor ska bli 1 V [1][8].

Kapacitansen (C) bestäms av arean (A) på elektroderna, avståndet (d) mellan dessa samt en dielektrisk konstant (ϵ) för isolatorn [1]. Ekvationen ses i ekvation 2.1.

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (2.1)$$

När en strömkälla kopplas till kondensatorn kommer den elektromotoriska kraften driva elektronerna från den positiva elektroden till den positiva sidan av strömkällan, samtidigt som den negativa sidan av strömkällan tillför elektroner till kondensatorns negativa elektrod [1]. Detta sker i samma takt hos båda elektroder tills spänningen över kondensatorn är samma som för strömkällan, se figur 2.3 [1].

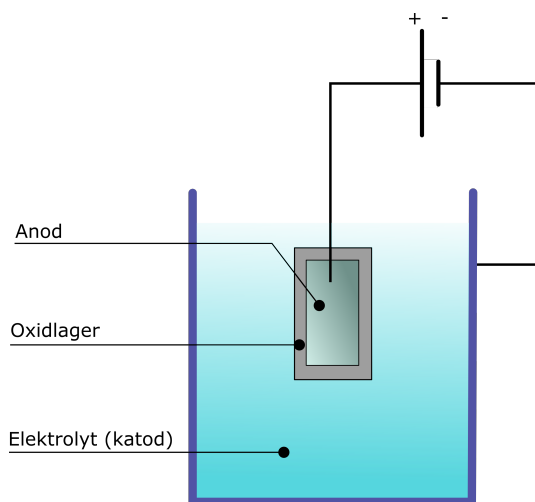


Figur 2.3: Under uppladdning flödar den elektriska strömmen mot den negativa sidan tills potentialskillnaden är utjämnad.

2.3.1 Elektrolytkondensatorn

I sina försök att förbättra det laddbara batteriet upptäckte Eugène Ducretet att aluminium bildade ett oxidskikt vid användning som anod i en elektrolytisk cell [2]. Detta oxidskikt hade väldigt högt motstånd vilket bidrog till att strömmen på kort tid nästan helt avtog [2]. När han ändrade riktning på strömmen så minskade motståndet och strömmen började flyta [2].

Oxidskiktet används som isolator i en elektrolytkondensator, samt skyddar mot kemiska reaktioner i elektrolyten [2]. En elektrolytkondensator kan matematiskt ses som en parallellkondensator enligt ekvation 2.1 [2]. För att öka kapacitansen enligt ekvation 2.1 kan arean på ytan där oxidskiktet skall bildas, ökas genom att etsa ytan [2]. Detta kan ske mekaniskt eller elektrokemiskt där det senare sker vid flera tusen Ampere i ett elektrolytbad bestående av en stark syra [9]. Efter de elektrokemiska baden tvättas aluminiumet innan det oxideras, med hjälp av en annan sorts elektrolyt för att sedan tvättas igen [9]. Nominell spänning avgörs av tjockleken på oxidskiktet [2]. Oxidlagrets tjocklek ökar linjärt med spänningen [2].



Figur 2.4: Aluminium elektrod med oxidskikt runt som anod i elektrolyt som fungerar som katod kopplad till spänningskälla [2].

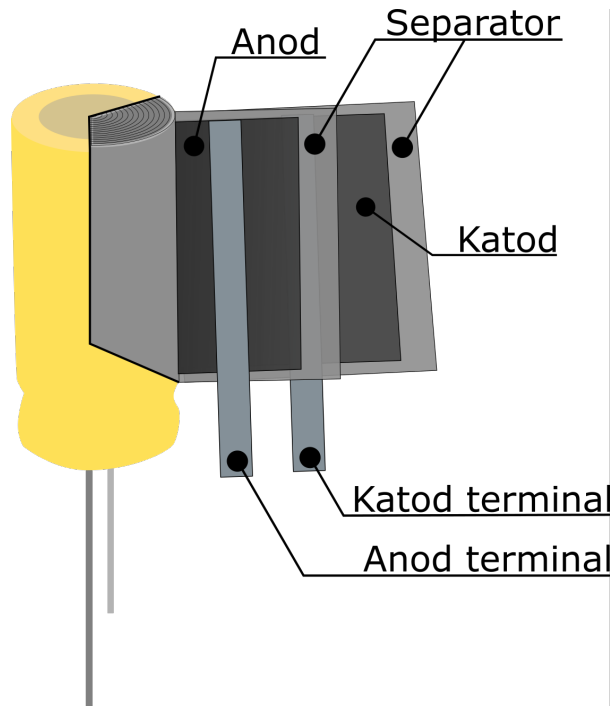
För att oxidskiktet inte skall förstöras när den inte är spänningssatt får elektrolyten ej vara sur upptäckte Charles Pollak [2][9]. Detta medförde korrosion på aluminiumfolien och/eller terminalerna, ökad läckström samt explosioner [9].

Samuel Ruben introducerade även en katod av aluminium vilken var åtskild från anoden av ett tunnare skikt elektrolyt [2]. Minskningen i avstånd gjorde att även förlusterna sjönk då det inre motståndet (ESR, equivalent

series resistance) sjönk [2]. Denna katod gör att elektrolytkondensatorn kan modelleras som två kondensatorer i serie med varandra vilket matematiskt kan beskrivas enligt ekvation 2.2 [9]. När katodens kapacitans är minst 10 gånger större än anodens bestäms den totala kapacitansen i huvudsak av anodens kapacitans [9].

$$\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = C_{tot} \quad (2.2)$$

Nästa framsteg för elektrolytkondensatorn var när Alfred Eckel dränkte papper i elektrolyt och placerade detta mellan elektroderna som bestod av aluminiumfolie, vilket medgav att konstruktionen nu kunde rullas ihop och på så vis ta mindre plats samt blev billigare att producera se figur 2.5 [9].



Figur 2.5: Illustration av superkondensatorn består av flera lager ihop rullad. [9]

Elektrolytkondensatorns elektrolyt

Elektrolytkondensatorns elektrolyt består av en blandning mellan syror och baser, detta för att ge elektrolyten ledande egenskaper [9]. Syrorna får precis som Charles Pollak upptäckte, dock inte reagera med oxiden i aluminiumet [9][2]. Elektrolytens viktigaste egenskap är lågt inre motstånd (ESR), detta åstadkommes av en god elektrisk ledningsförmåga hos jonerna i elektrolytblandningen [9]. Elektrolyten står numera för ca. 40% av ESR, på 80-talet utgjorde den 70% [9]. Resterande ESR kommer från förluster i folien, terminalerna samt oxidlagret [9]. Det är elektrolyten i elektrolytkondensatorn som sätter begränsningarna för i vilka applikationer den kan användas, förutom god ledningsförmåga så skall den helst även ha en hög kokpunkt, låg fryspunkt, ha låg viskositet, ej vara giftig, vara miljövänlig, ha ett stort spänningsspann, ha lång livslängd, kunna släcka sig själv vid brand, vara relativt billig, ha en kemisk sammansättning som är så olämplig för läckström som möjligt samt måste kunna förse elektroderna med syre så att dessa kan oxidera samt självläka [2]. Självläkningsprocessen bidrar till att läckströmmen sjunker under drifttiden då de små defekter som finns i oxideringslagret brukar bli återställda [9]. Att uppnå alla dessa krav i samma lösning har ej uppnåtts, därför används i stora drag numera tre olika elektrolytlösningar beroende på vilka krav som applikationen behöver möta:

- Glykol eller Borax är hälsofarligt, har en lösning med 5-20% vatten. Syran i elektrolyten och alkohol (glykol) orsakar en kemisk reaktion som bildar estrar och vatten. [9].
- Organiska lösningsmedel som GBL som används till mycket inom industrin och har en stor användningsområde [10]. Den är miljövänlig men hälsofarligt [10]. DMA är en organisk förening som kan orsaka leverskador samt

har hög kokpunkt (166 °C) [11]. DMF kan ge fosterskador och leverskador vid inandning eller hudkontakt, möjligtvis cancer samt har en hög kokpunkt (153 °C) [12]. Alla dessa är nästan helt vattenfria vilket bidrar till lång livstid [9].

- Lösningar som innehåller uppemot 70% vatten, dessa används för höga rippelströmmar ("ripple current") i kondensatorer av dålig kvalitet [9]. DC strömsignaler i kretsar har en del AC, denna del avses som rippelströmmen [13][14]. Vissa kondensatorer har ett högt rippelström kvalitet, andra har lågt [13]. Temperaturen beror på rippelström, termisk motstånd samt ESR [13].

Livslängd

Anledningen till att lösningar med hög andel vatten har kortare livslängd beror på att dessa dunstar över tid [9]. I början av 50-talet upptäckte man även att det bildas vätgas när aluminium kommer i kontakt med vatten vilket resulterar i ökad läckström samt reducerad livslängd [9]. Livslängden beror även på temperatur och spänning då dessa bryter ner elektrolyten vilket resulterar i att gas bildas [9]. Bildningen av gas medför ett ökat tryck i elektrolytkondensatorns kapsling, samt att elektrolytens massa minskar [9]. När detta sker så sjunker kapacitansen och ESR samt impedansen ökar [9]. Vid nominell spänning och temperatur har dagens elektrolytkondensatorer en livslängd på 15 år eller längre vid 65 °C [9]. När man pratar om livslängd så menar man inte att den har slutat fungera utan att uppsatta gränsvärden för ESR och kapacitans har passerats [9].

2.4 Superkondensatorn

Superkondensatorn uppfanns år 1957 av H. Becker [9]. Den har funnits på marknaden sedan 2000-talets början [15]. Superkondensatorn har många användningsområden, från bromssystem i bilar till energireserv i telekommunikations system [16]. Ofta används den tillsammans med batterier då dessa kan avge en låg laddning under en längre period medan superkondensatorn kan avge en hög laddning under en kort tidsperiod [1][4].

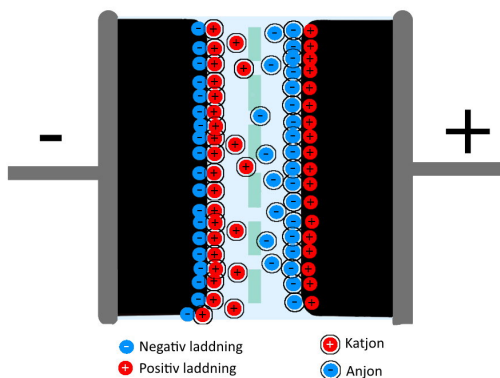
Superkondensatorn är en vidareutveckling av elektrolytkondensatorn [1] och sparar energi på två sätt:

- Statiskt energi som lagras i dubbellagret [9]. Att statiskt lagra energi kallas för en icke faradisk process då inga kemiska processer sker [1].
- Faradisk energi där utbyte av elektroner sker mellan elektrod samt elektrolyt, så kallad pseudokapacitans [9]. Då detta är en kemisk process är det därmed även en faradisk process [1].

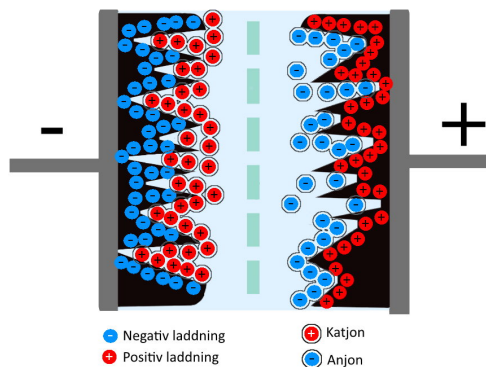
Båda dessa kapacitanser bidrar till den totala kapacitansen hos superkondensatorn [9]. Hur stor vardera är varierar beroende på elektrolytens sammansättning samt elektrodens utformning [9]. Denna rapport kommer fokusera på den icke faradiska processen då superkondensatorn som används i detta arbete bygger på den elektriska dubbelskikt-kondensatorn (EDLC, electrical double layer capacitor)[17].

2.4.1 Elektriskt dubbelskikt

Superkondensatorn håller sin laddning via det elektriska dubbelskikt som uppstår vid varje elektrod [15]. Detta fenomen upptäcktes av Helmholtz år 1898 [18]. Dubbelskiktet uppstår av jonerna i elektrolyten som lägger sig som ett lager mot elektrodens yta under laddning [19]. Detta fenomen medför att superkondensatorn kan modelleras precis som elektrolytkondensatorn som två kondensatorer i serie enligt ekvation 2.2 [15]. Ett dubbellager räknas ut med kondensatorns ekvation 2.1 [15][20]. Värdet på den totala kapacitansen för superkondensatorn, summan av båda dubbellagren (C_{tot} i ekvation 2.2) är det som anges i datablad för kommersiell produkt [17]. Superkondensatorn har anod samt katod täckt av porös kol som maximerar ytan mellan elektronerna och jonerna i elektrolyten [20].



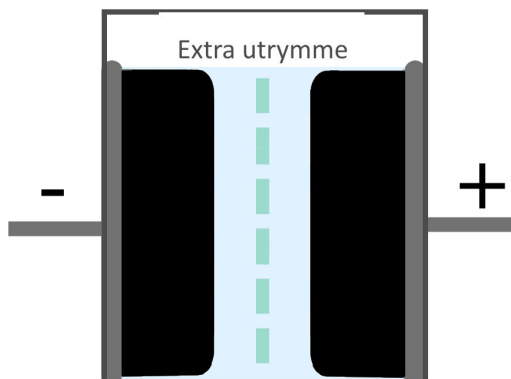
Figur 2.6: Dubbelskikt ideal figur.



Figur 2.7: Illustration av dubbelskikt med kolporer.

2.4.2 Kapsling

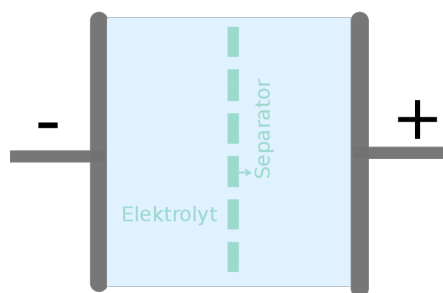
Kapslingen ska skydda mot omgivningen och är helt tillsluten för att inte släppa in föroreningar. Det finns dock en säkring inbyggd i kapslingen, ett område som är tunnare än resten av kapslingen så att vid ökat inre tryck som uppstår av gasbildning ska denna del ge vika och utjämna tryckskillnaderna och på så vis undvika en explosion [21]. Inuti kapslingen finns det även extra utrymme för gasen. När säkringen har gått är superkondensatorns kapacitiva förmåga reducerad [21].



Figur 2.8: Superkondensatorns kapsling. Illustrerar extra utrymme för gasen samt säkring (som tunnare del).

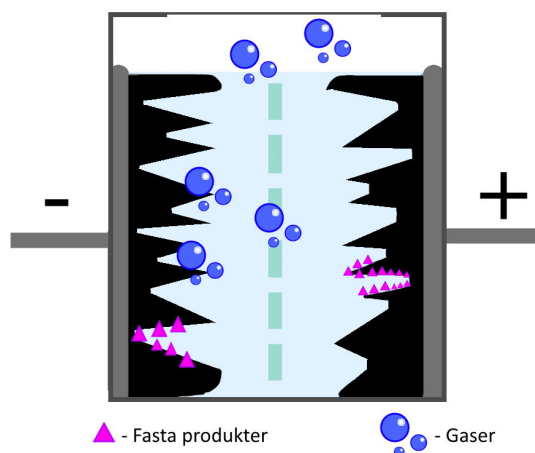
2.4.3 Superkondensatorns elektrolyt

Superkondensatorns anod och katod har kontakt med varandra via elektrolyten, en organisk vätska eller vattenlösning [15][20]. Mellan elektroderna sitter en separator av exempelvis papper som galvaniskt isolerar mellan elektroderna för att undvika kortslutning [15]. Se figur 2.9.



Figur 2.9: Princip illustration av superkondensators uppbyggnad utan kollagen [15].

Precis som elektrolytkondensatorerna avgörs nominell spänning samt livslängd vid valet av elektrolyt [15]. På grund av den organiska elektrolyten fungerar superkondensatorer endast runt 2,5 V samt vid maximalt 3 V [15]. Genom att använda sig av högre spänning accelereras sönderfallet, samt bildning av gas, av elektrolyten [22]. Att temperaturen accelererar åldringsprocessen har att göra med att ökad temperatur ger de kemiska komponenterna en ökad reaktivitet [22]. Porerna i kolet görs precis som vid etsning av elektrolytkondensators anod/katod genom en kemisk process, efter processen tvättas kemikalierna bort men en del blir kvar. Dessa reagerar med jonerna i elektrolyten. Då bildas gasformiga och fasta reaktionsprodukter som försämrar superkondensators prestanda och därmed påskyndar åldringsprocessen [18].



Figur 2.10: Gaserna och de fasta produkterna blockerar por ytan vilket medför att reducerad energi kan användas. Dessutom kommer gaserna bidra till högre tryck inne i kapslingen. [18]

2.4.4 Kapacitans

Då föroreningarna binder sig till jonerna som ska användas av elektronerna sjunker kapacitansen, energilagringssmöjligheterna som följd. Hur mycket som kan lagras beror även på hur långt in i porerna som jonerna hinner. Laddas superkondensatorn ur kort inpå uppladdningen så hinner inte jonerna ta sig djupt ner i porerna utan hamnar ytligt vilket bidrar till att mindre laddning hinner sparas. Detta leder även till ett omedelbart spenningsfall över superkondensatorn

när strömkällan kopplas bort [15]. Ekvationerna för laddning ses i ekvation 2.3 samt ekvation 2.4.

$$Q = I * t \quad (2.3)$$

$$Q = C_{cell} * V \quad (2.4)$$

Vid högre temperatur ökar kapacitansen [23, s. 375].

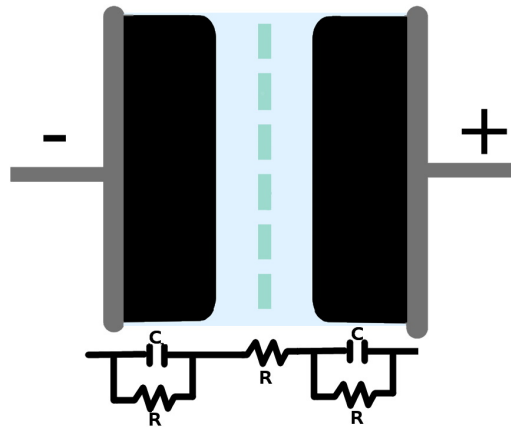
Mätning av kapacitans

Tillverkarens metod för att utläsa kapacitansen innebär att kontrollera lutningen mellan 1,5 V samt 2,5 V på uppladdningskurvan vid uppladdning med 1 A [24]. Vanligare är att utläsa lutningen på urladdningskurvan [3][25][26]. Metoden baseras på ekvation 2.5.

$$i = C \frac{dV}{dt} \quad (2.5)$$

2.4.5 ESR

Eftersom jonernas rörelse mot elektrodernas ytor är avgörande för energilagringskapaciteten så vill man ha ett så lågt ESR som möjligt [19]. Motståndet som finns inne i en superkondensator uppstår när jonerna tar sig igenom porerna av kol, elektrolyten samt separatoren [23, kap. 11]. Vid högre temperatur blir motståndet mindre i elektrolyten vilket bidrar till lägre ESR [23, kap. 11]. Molekylerna som uppstår av de organiska föreningarna fastnar i porerna samt separatoren vilket gör det svårare för jonerna att ta sig igenom, vilket resulterar i högre ESR över tid [23, kap. 11].



Figur 2.11: Modell av ESR i superkondensator [25].

Mätning av ESR

Tillverkaren har en metod där ESR ska urläsas ur uppladdnings grafen vid 1 A [24]. Till detta rekommenderas ett digitalt oscilloskop [24]. Metoden baseras på Ohms lag, när strömmen är 1 A så blir ESR det initiala spänningshoppet.

Ett annat sätt är att efter uppladdningsfasen få en urladdningskurva där man belastar med samma ström som vid uppladdning [3][25][26]. Metoden är baserad på samma princip som tillverkarens med skillnaden att här mäts spänningsfallet som uppstår när strömkällan kopplats bort.

Optimalt ska AC impedansmätningar utföras för att kunna separera motståndet i kolet från elektrolyten [26]. Denna metod anses vara den mest exakta.

2.5 Livslängd

För att bedöma livslängden på elektrolytiska kondensatorer brukar man utföra accelererade tester med maximal spänning på maximala temperaturen, T_{max} . Som resultat får man faktorn L_{spec} som kan användas för en uträknad förväntad bedömning av livslängden och kan fås från tillverkarens datablad. Med ekvation 2.6 kan den förväntade livslängden beräknas, där L_X är livslängden i timmar och temperaturen i Kelvin. Varje 10K sänkning medför till dubbla förväntad livslängd [9]. Endast satt temperatur tas i hänsyn i ekvation 2.6, inte derating av spänning. Därför kan ekvation 2.8 vara användbar med spänning som ytterligare parameter.

$$L_X = L_{spec} * 2^{\frac{T_{max}-T_X}{10}} \quad (2.6)$$

Superkondensatorer har till skillnad från batterier inte en konkret livslängd. Livslängden definieras utav att kapacitansen sjunkit med 20% - 30% och/eller när ESR ökat med 200% [21][26]. Superkondensatorers åldringshastighet baseras främst på ett temperaturen och spänningen som de utsätts för [21][22][27]. Som nämnts tidigare i Teori-delen, Elektrolyt, påverkar temperatur och spänning genereringen av gaser i superkondensatorn.

En åldringsfaktor α kan ses som en enhet för ungefärlig förutsägelse av superkondensatorernas nyttiga förbrukningstid. Denna ökar beroende på parametrarna. En tidigare studie fick en åldringsfaktor 2 för superkondensatorer. Under testerna hölls spänningen konstant. Studien kom fram till ifall spänningen höjs med 0.1 V eller att temperaturen höjs med 10 C° ökas åldringshastigheten med 2. Det ställs även ett antagande att spänningen har en större påverkan på gasalstrandet än temperaturen. [28]

2.5.1 Arrheniusekvationen

Eftersom Arrheniusekvationen beräknar den kemiska reaktionens hastighet (rörelse) vid en viss temperatur kan denne tillämpas för att undersöka energilagringsskapaciteten [26][19].

$$C = Ae^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (2.7)$$

där A är en konstant, E_a är aktiveringsenergin, R är gaskonstanten, T är absolutvärdet av temperaturen och C är energilagringen [19][26].

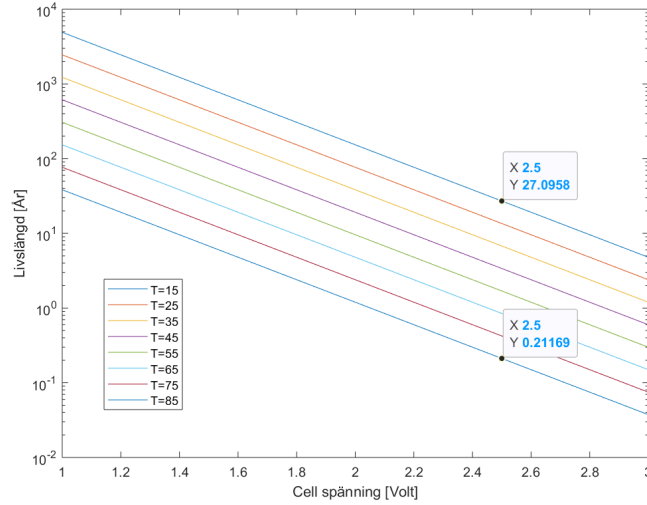
2.5.2 Förväntad livslängd

En Arrheniusmodell brukar oftast användas i samband med accelererade tester för att uttrycka temperaturberoende för livslängden. Arrheniusekvationen tar hänsyn till temperaturen och genom högre temperatur ges en förhöjd kemisk reaktionshastighet. [26] Superkondensatorn degraderas när kemiska händelser förekommer.

Den förväntade livslängden per cell kan beräknas med ekvation 2.8 [22][29][30].

$$T(U, \vartheta) = c_1 \cdot e^{\left(\frac{U}{c_2} \cdot \frac{\vartheta}{c_3}\right)} \quad (2.8)$$

där ϑ är temperaturen på cellen och U är spänningen. Konstanterna är negativa. Där $c_1 = 1.4 * 10^{13}$ sekunder, $c_2 = \frac{0.2}{\ln(2)}$ volt och $c_3 = \frac{10}{\ln(2)}$ °C.



Figur 2.12: Den förväntade livslängden per cell. Graferna åskådliggör hur många år cellen förväntas klara av på en viss temperatur samt vid specifik spänning.

Vanligtvis brukar inte temperaturen och spänningen vara konstant, då behövs en ekvation som tar den dynamiska förändringen genom tid. [30]

$$T_d(U(t), \vartheta(t)) = \frac{1}{\frac{1}{c_1} * \int_{t_{end}}^{t_{init}} e^{\frac{U(t)}{V_0} + \frac{\vartheta(t)}{\vartheta_0}}} \quad (2.9)$$

där T_d innebär den dynamiska livstiden i sekunder, $U(t)$ är den föränderliga spänningen, $\theta(t)$ är den föränderliga temperaturen i Celsius, t_{init} start tiden och t_{end} är stoptiden i sekunder. $c_1 = 1.4 * 10^{13}$ sekunder [30]. Om superkondensatorns åldring påverkas av varierade temperatur bör ekvation 2.9 användas.

2.5.3 Temperatur

Den omgivande temperaturen har en väsentlig påverkan på superkondensatorerna. Vid låg temperatur har superkondensatorerna lägre elektrisk ledningsförmåga [23, s. 134]. En viktig parameter är den värmegenerering från komponentens användande samt omgivande temperaturen. Superkondensatorernas förlorade energi alstrar värme under laddning- och urladdningsfaserna (gäller superkondensatorer med väldigt hög kapacitans.) [15]. Joules lag beskriver graden av värmeutveckling hos större superkondensatorer [15]. Som det även nämns i tidigare studier är temperaturen en väsentlig parameter för livstiden [26][21].

2.5.4 Derating

Komponenter som används nära eller på sin nominella (rated) värde har en kortare livslängd än vad de optimalt skulle kunna ha [31]. Med konceptet derating menas att använda sig av värden under den nominella värdet [31]. I tidigare studier anses 80% av superkondensatorns nominella spänning tillräckligt för att öka livslängden [27][31].

2.5.5 Spänningsbalansering av superkondensatorcell

Vid användning av flera superkondensatorer i serie behövs ett balanseringssystem för att de ska åldras lika snabbt [22][27]. Livslängden för superkondensatormodulen bestäms av den cell (superkondensator) med kortast livslängd [22]. Att inte alla celler har samma beror på tillverkningsprocessen där bl.a. kapacitans, inre resistans, självurladdnings hastighet och cellernas spänningar kommer skilja sig mellan superkondensatorerna [22]. Detta leder till att spänningen blir olika över cellerna och därmed blir även livslängden olika [22].

För att jämna ut spänningen mellan cellerna kan resistorer eller zenerdioder användas för att omvandla strömmen till värme enligt ekvation 2.10. Detta är det billigaste alternativet men den stora nackdelen om man bortser från effektförlusterna är att det tar lång tid för spänningen att sjunka till önskad, och under denna tid kan cellen vara utsatt för en högre spänning än nominell som leder till sänkt livslängd [32].

$$P = r * i^2 \tag{2.10}$$

För att undvika höga förluster samt för att uppnå omedelbar spänningsbalansering kan switchade alternativ användas, nackdelen är dock den ökade kostnaden [22]. Switcharna behöver styras vilket kan ske med t.ex. mikrokontroller [33]. Denna kan antingen mäta spänningen över cellerna och justerar deras individuella spänning via switcharna, alternativt sätta en fast duty cycle. Metoden går ut på att spara den överflödiga energin i induktanser samt distribuera spänningen till de andra cellerna vid behov [32].

2.6 Test

Det finns i huvudsak två tester som man brukar utföra på superkondensatorer. Dessa beskrivs i respektive under-rubriker.

För att kunna avgöra när testerna ska avslutas behöver ESR och kapacitansen mätas. Det förväntas även att om testen i temperaturskåpen avbryts under en längre period så kommer kapacitansen öka [21]. Men när testet sedan återupptas så kommer kapacitansen fort sjunka till det värde som uppmättes direkt efter testet [21].

2.6.1 Calendric lifetime testing

Den ena testen kallas "Calendric lifetime testing" och innebär att man spännsätter superkondensatorn med konstant spänning i en specificerad temperatur [21].

Genom Calendric testing kan läckströmmen bedömmas [34]. Antaganden om livslängd kan göras med hjälp av Arrheniusekvation. Eftersom mätningar för kapacitansen och ESR erhålls från laddning eller urladdning krävs att systemet kör en cykel (urladdning och uppladdning) för att få ut värdena. [21]

2.6.2 Cyclic testing

Den andra testen kallas "Cyclic testing" och innebär att ladda den och urladda den periodiskt [21]. Med Cyclic testing kan värmegenereringen bedömmas och dessutom kan livslängd uppskattas i form av antal cykler. [34]

2.6.3 Temperatur

För att undersöka hur superkondensatorn klarar olika temperaturer kan urladdningskurvor observeras [19]. Det vill säga att man utför en fullständig cykel för att få mätvärden på ESR och kapacitansen.

2.6.4 Temperaturprofil

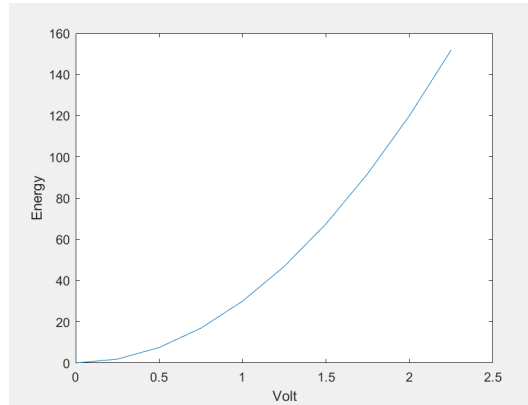
En temperaturprofil kan användas för att uppskatta en dynamisk livslängd då temperaturen varierar per säsong. De varierande temperaturvärdena kan då bli en parameter i ekvation 2.9.

2.6.5 Läckström

För att få fram läckströmmen via experiment spännsätter man superkondensatorn, den ström som behöver tillföras för att behålla spänningen är läckströmmen [34]. Denna ström kommer sjunka över tid.

2.7 Modell

Att modellera en superkondensator har visat sig inte vara helt trivialt då spännings/energi kurvan är olinjär [16], se figur 2.13 [35].



Figur 2.13: Olinjär samband mellan spänning och energi [35].
Baserad på ekvation 2.11 där $C_{cell} = 60 F$.

De matematiska formler som beskriver sambandet mellan energi och volt ses i ekvation 2.11 samt ekvation 2.12 [35].

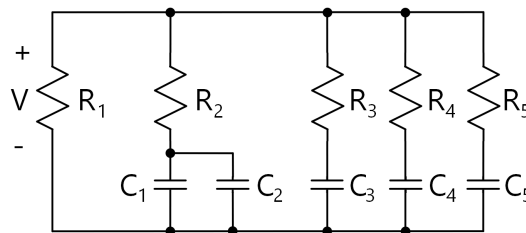
$$E = \frac{C_{cell} * V^2}{2} \quad (2.11)$$

$$E = U * I * t \quad (2.12)$$

För att försöka modellera detta beteende har olika modeller tagits fram [16].

2.7.1 Tregrens modell

För att modellera beteendet i figur 2.13 är modellen med tre grenar den mest vedertagna, där varje gren representerar en fördröjning i tid [36]. Dessa fördröjningar modellerar att jonerna tar sig längre in i porerna eftersom tiden går vilket gör att spänningen över superkondensatorn sjunker [36]. En parallell kondensator har även lagts till i första grenen vars kapacitans ändras med spänningen [36].

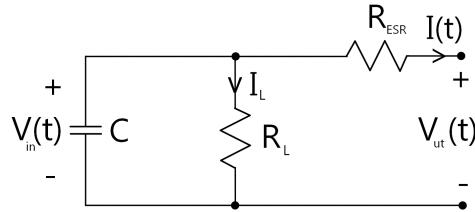


Figur 2.14: Modell för att beskriva superkondensatorn. Grenarna används för att modellera olika grader av tidsberoende variabler.

Nackdelen med denna modell är att värdena måste tas fram experimentellt [36]. Men när en modell behövs för att t.ex. undersöka läckström, ESR samt kapacitans över en längre period så är denna att föredra. Däremot så är den inte en perfekt modell då denna modell ej tar hänsyn till självurladdningen hos superkondensatorn [36].

2.7.2 Förenklad modell

För simulering över kort tid kan den förenklade modellen av superkondensatorn användas som ses i figur 2.14 [16].



Figur 2.15: Förenklad modell av en superkondensator. V_{in} är spänningen som laddar upp kondensatorn. R_L modellerar läckströmmen I_L . R_{ESR} modellerar superkondensatorns inre seriemotstånd. $I(t)$ är strömmen ut och V_{ut} är spänningen ut.

2.7.3 Matlab

För uppskattning av olika spänningsnivåer, efter att en viss uteffekt, används (i Matlab) formeln:

$$V(t) = \sqrt{\frac{1}{C_{cell}} \left(\frac{Q_0^2}{C_{cell}} - 2 * P * t \right)} \quad (2.13)$$

där $V(t)$ är spänningen över superkondensatorn vid en viss tidpunkt t , t är tiden i sekunder, C_{cell} är superkondensatorns kapacitans, P är uteffekten i watt, Q_0 är superkondensatorns initiala laddning. [35]

2.8 Val av leverantör

Lista med tillverkare som hade rätt värden och lägst läckström, ESR, rated spänning, temperaturintervall

Tillverkare	Kapacitans	Läckström	ESR	Märkspänning
Tecate Group	70 F	150 μA	0,020	2,7 V
Vishay BC components	60 F	300 μA	0,017	3 V
Eaton	60 F	135 μA	0,013	3 V
Maxwell Technologies	10 F	23 μA	0,030	2,7 V

Tabell 2.1: Lista med tillverkare.

Valet föll på Eaton 60 F. Med en maximal ESR på 0,013 Ω ger detta en minimal samplingsrate på 1000 samplingar per sekund då $\frac{1}{1000} = 0,001$. Eatons superkondensator har dessutom en låg läckström, samt 3 V märkspänning som ger upphov till en större spänningsmarginal relaterat till derating.

3

Metod

De moment vars metod redovisas i denna rapport kan ses i tabell 3.1 samt under respektive underrubrik. Metoderna är grundade på litteraturstudien, teori som framkom under studien ses under kapitel 2.

Delmoment	Beskrivning
Litteraturstudie	Tidigare forskning
Simulering av krets	Simulering
Konstruktion av krets	PCB, Layout
Test av krets	Accelererande livslängdtest

Tabell 3.1: De fyra momenten vars metod redovisas i denna rapport.

3.1 Litteraturstudie

Sökord som använts för att göra litteraturlistan presenteras under rubriken sökord. En sammanställning av källorna presenteras i litteraturbas. Sammanfattning och värdering av innehållet som hittades i litteraturbasen ses under kapitlet tidigare forskning.

3.1.1 Sökord

Med Linköpings universitetsbiblioteks databaser samt Google Scholar upprättas en litteraturbas bestående av vetenskapliga artiklar och böcker. Sökord som använts samt en sammanställning av källorna presenteras.

Sökord
Superkondensator, Supercapacitor, Supercap, Arrhenius equation supercapacitor, Supercapacitor model, derating, balancing supercapacitor

3.1.2 Litteraturbas

Litteraturbasen som använts under kapitel 2.

Litteraturbas	
Böcker	[15][20][23]
Test	[21][26][28][37][25]
Modell	[16][36][38][39][40][35]
Livslängd	[29][27][19][18]
Balansering	[33][41][22][32]

3.2 Simulering

Kretssimulering sker i LTSpice för att bestämma storlek på superkondensatorerna via simulering av effektkrav 1 och 2. Värdena på balanseringsmotstånden skall bestämmas via simulering. För att kunna simulera den maximala spänningsskillnaden som kan uppstå sätts superkondensatorernas värden till det högsta respektive lägsta kapacitansvärdet som specificerats av tillverkarens produktionsspann [17]. Värdena på balanseringsmotstånden ska bestämmas så att vid full laddat så ska spänningsskillnaden vara under 0,1 V, detta så att den ena superkondensatorn ej ska ha en halverad livslängd jämfört med den andra. Målet är att spänningen ska vara lika.

Den förenklade modellen som ses i figur 2.14 används för simuleringen då denna har visat sig tillräckligt verklighetstrogen för uppladdningsfasen. Denna modell är dock inte tillräckligt tillförlitlig när det gäller läckströmmen under urladdningsfasen [36]. Denna förväntas inte simulera fyra veckors effektkravet på ett korrekt sätt men ur simuleringen borde det gå att få ut vilken spänningsnivå som fyra veckors testet ska starta på.

Tregrens modellen [39] har visat sig mer tillförlitlig men har sina brister. För att kunna identifiera parametrarna för denna krävs det en hög noggrannhet hos mätutrustningen. Denna är ej helt verklighetstrogen då modellen ej tar hänsyn till självurladdningen.

Val av metod föll istället på att kontakta tillverkaren av superkondensatorerna. Denna uppgav att de har gjort mätningar vid 1,85 V vid olika temperaturer. Vid 20 °C var läckströmmen 3 μA , vid 40 °C 8 μA och vid 65 °C 25 μA . De förväntade sig ej lägre läckström vid lägre spänning. Testerna utfördes efter 1000h konstant strömtillförsel. Läckströmmen som uppges i databladen är efter 72h och värdet används av tillverkaren i produktionen för att få en indikation och något att mäta på ett accelererat sätt.

Som komplement till LTSpice kommer matlab användas då denna kan plotta matematiska formler.

3.3 PCB

PCB (Printer Circuit Board) även kallad mönsterkort skall designas. Komponenter beställs från från Farnell, mönsterkort från Cogra.

Programvaror

- Orcad Capture
- Altium Designer

Kretsschemat skapas i OrCAD och PCB i Altium Designer. PCB-filen baseras på arbetet från kretsschemat då man exporterar en nät-fil från OrCAD som innehåller dem nödvändiga länkade kopplingarna som Altium Designer måste läsa in. Footprints upprättas för alla komponenter i Altium, till dessa ska även step filer finnas för att generera

3D-rendering av kortet. Step-filerna hämtas från hemsidan www.grabCAD.com. Konturen av kortet är given via en DXF-fil.

Vid val av komponenter måste den maximala effekten genom de olika delarna i kretsen tas hänsyn till effekten, $P = U * I$. Under uppladdning är strömmen begränsad till 0,2 A. När superkondensatormodulen är fulladdad erhålls maximal effekt, i detta fall: $4,5 \text{ V} * 0,2 \text{ A} = 0,9 \text{ W}$. Detta medför att balanseringsmotståndet kommer utsättas för 0,45 W. Valet av SMD föll på imperial 1210 då denna ej är för stor och därmed får plats på kortet samt klarar en effekt på 0,5 W [42]. För att få större marginal till maximal effekt delas balanseringsmotståndet över den enskilde superkondensatorn till två i serie för att på så sätt få ökad marginal. Med detta val kommer den enskilde resistorn att maximalt kunna utsättas för: $0,2 \text{ A} * 1,125 \text{ V} = 0,225 \text{ W}$.

Vid urladdning från fullständigt uppladdad modul kommer maximal effekt vara $4,5 \text{ V} * 3,33 \text{ A} = 15 \text{ W}$. Dock kan det inträffa att superkondensatormodulen ej hunnit laddas upp till maximal spänning innan urladdning påbörjas. Den högsta strömmen som kan genereras är när spänningen är som lägst, 2,5 V. Detta ger oss en maximal ström på: $\frac{15 \text{ W}}{2,5} = 6 \text{ A}$ att ta hänsyn till. För varje Ampere bör kopparledningen på PCB vara 1 mm, detta ger oss en bredd på 6 mm sammanlagt .

3.4 Test

Metoder för följande tester presenteras i detta avsnitt:

- Effektkrav
- Livslängd

Metoderna baseras på teorin som presenterats i denna rapport. Grunden för Python skripten som används är givna. Vald metod redovisas under respektive sektion. Material samt mätningar som behövs för att genomföra testerna presenteras först.

3.4.1 Material

Material som användes under testerna presenteras i tabell 3.2.

Tabell 3.2: Material till tester.

Beteckning	Beskrivning
Vötsch VT4002	Temperaturskåp inställt på 85 °C.
Keithley 2306	Batterisimulatorens har två kanaler som används för att kontinuerligt spänningsätta kretsarna till 3 V respektive 2,25 V i temperaturskåpet.
TTi EL183	Spänningskällan levererar 1 V till balanseringen av kretsarna i temperaturskåpet.
TTi LD300	Elektronisk DC last för att testa effektkraven 1 och 2, samt ett praktiskt sätt att ladda ur kondensatorerna för olika tester.
TTi PL303QMD-P	Spännings-/strömkällan används för uppladdning av kretsarna och som styrsignal till LD300. Ansluts via USB.
Saleae Logic Pro 16	Logik analysator för mätningar av ESR.
Agilent 34401A	Bänkmultimetern används för framtagande av mätdata i samband med tester. Ansluten via RS-232 port.
Nollmodem	RS-232 kabeln behöver adapter-anslutningen då denna ej har korsade ledare.
KUSB-488B	USB till GPIB anslutning.
Banankontakter	Löddes fast på korten som testas i temperaturskåpet för att enklare kunna utföra testerna.

3.4.2 Mätning av ESR och kapacitans

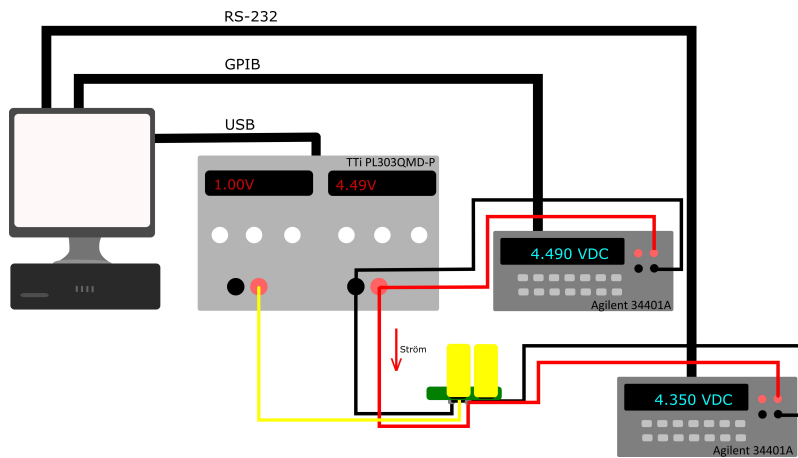
Vald metod är tillverkarens metod med motiveringen att de som har konstruerat dem borde veta hur man bäst får fram ESR och kapacitansen på deras produkt. Då metoden är baserad på en superkondensator behövs metoden justeras så rätt värden erhålls för två i serie. Detta sker genom att utföra mätningar på vardera superkondensator och sedan räkna ut vad värdena borde bli för båda i serie enligt ekvation 2.2 för att sedan justera vart i kurvan kapacitansen ska avläsas.

Avläsning kommer ej ske med digitalt oscilloskop som tillverkaren rekommenderat då detta ej finns att tillgå under testperioden.

Om denna metod anses missvisande skall metoden där värdena urläses ur urladdningskurvan användas.

Mätning av resistansen i kablar

Om det ej går att mäta direkt på superkondensatorerna med mätinstrumentet så behöver fyrtråds-mätning (även kallad 4-tråds Kelvin) tillämpas för att erhålla rätt mätvärden. Annars kommer kablgets resistans att ge missvisande resultat.



Figur 3.1: Uppladdningsuppkoppling med två multimetrar för att mäta skillnaden i spänning över kablar. Detta användes för att mäta resistansen i kablarna.

Vid fyrtråds-mätning mäts spänningen i var ände av kablagen som ska räknas bort. Spänningsskillnaden delas sedan med strömmen som i vårt fall är 1 A för att få fram resistansen i kablarna.

3.4.3 Livslängd

Vald metod för att uppnå 15 års livslängd är att sänka kretsens nominella spänning. Metoden ska undersöka om sänkningen av spänningen ger förväntad effekt. Då testerna ej kan fortgå under 15 år kommer livslängdstestet att accelereras via temperatur med hjälp av ett temperaturskåp. Denna sätts till 85 °C då detta är den maximala spänningen som superkondensatorerna tål. Kretsarna kommer vara spänningssatta under hela tiden i skåpet, 5 st. till 3 V och 5 st. till 2,25 V. 5 kort används till vardera spänning för att få med de eventuella statistiska skillnaderna. Det som förväntas är en kurva som faller snabbare för de med 3 V än för de med 2,25 V.

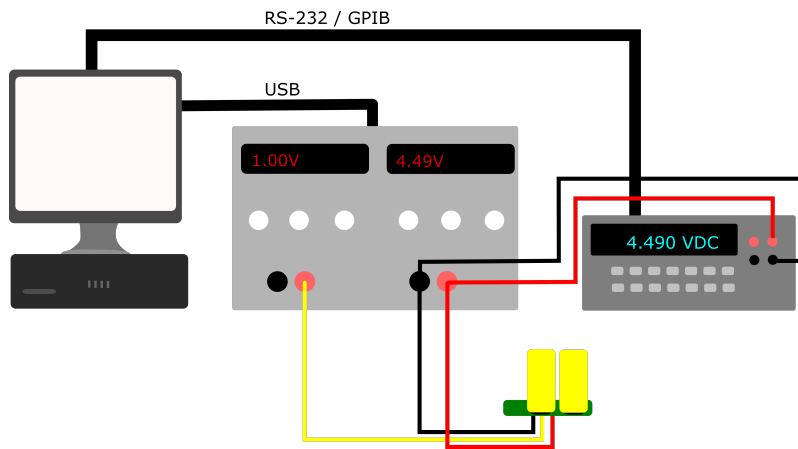
Förväntningarna kommer från jämförelser med databladet samt vetenskapen att superkondensatorn får halverad livslängd för varje 10 °C ökning över 20 °C. Samt att en halvering av livslängden sker vid spänningsökning med 0,1 V.

I databladet står det att vid 3 V och 65 °C samt 2,5 V vid 85 °C håller superkondensatorn i 1000h [17]. Enligt detta kan en antagande göras att superkondensatorn borde få en livstid på 250h vid 3 V och 85 °C då $\frac{1000}{4} = 250h$ samt en livstid på $1000 * 2^{2,5} \approx 5657h$ vid 2,25 V vid 85 °C. Då det skiljer 0,25 V mellan de två olika testen och varje 0,1 V innebär dubbla livslängden förväntas kondensatorerna hålla $2^{2,5}$ gånger längre.

För 2,25 V i 25 grader blir det $1000 * 64 = 64000h$ med temperatur skillnaden, då vi sänker temperaturen med 60° så kommer timmarna öka med $2^6 = 64$. Tillsammans med $1000 * 2,5 = 2500h$ för derating vilket ger 66500h. $\frac{66500}{10920} = 6,089h = 365,38min = 21923sekunder$ som cyklerna med hålltid får ta i snitt om livslängdskravet ska uppfyllas. Kurvan förväntas falla $250/2500 = 0,1$ vilket innebär 10 gånger snabbare för de med 3 V över sig än för de med 2,25 V.

Detta stämmer inte vid jämförelse med grafen figur 2.12 $24h * 365 * 0,399$ (värde från graf) = 8700h. Grafen justeras därför efter detta. Ekvationen som genererar grafen tar hänsyn till materialet i superkondensatorn, denna information är ej tillgänglig i detta fall därav justeringen behövs.

Innan testet påbörjas inhämtas startvärdena för kapacitansen samt ESR. Dessa värden sparas i ett Excel dokument. Detta görs sedan varje vardag för att se när ESR har nått 200% av ursprungsvärdet alternativt när kapacitansen har sjunkit till hälften för en enskild superkondensator. Mätningar kommer att göras på hela kretsen fram tills att värdena närmar sig gränsvärdena, då kommer mätningar på de enskilda superkondensatorerna att börja göras. När någon av gränserna har passerats, avslutas testet i temperaturskåpet för att undvika att superkondensatorns säkring utlöses. Innan testet tas kretsarna ur skåpet och får stå framme tills de har uppnått rumstemperatur. Temperaturen kommer ej att mätas med termometer utan metoden är att känna på superkondensatorerna med handen. För att få fram en kurva att läsa ut värdena från plottas mätvärdena i Matlab.



Figur 3.2: Uppladdningsuppkoppling. Användes för att mäta ESR och C på kretsar.

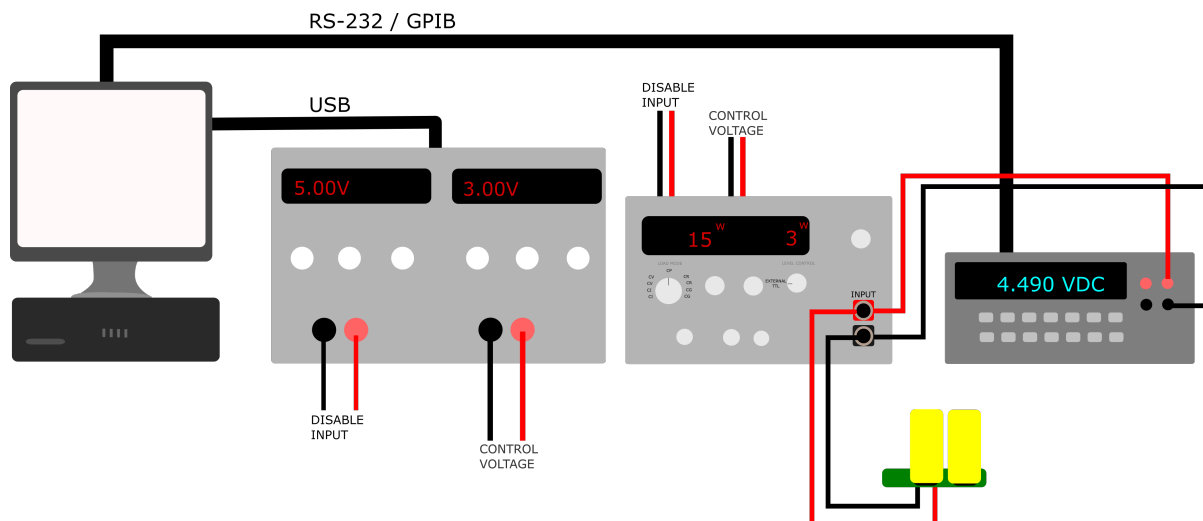
För att styra multimetern samt strömkällan används ett Python skript vardera. Multimeterns skript registrerar kontinuerligt mätvärden i en text fil och är helt oberoende av externa signaler men skickar en signal (1/0) via ett textdokument när 4,5 V uppmätts. Spänningkällans skript körs tills multimeterns signal får den att sluta.

3.4.4 Effektkrav

Två olika metoder används för att testa effektkraven. Dessa presenteras under respektive underrubrik.

Effektkrav 32 sekunder

Med jämna mellanrum testas effektkrav 1 och 2 (tabell 1.1) på kretsarna i temperaturskåpet. Dessa tas ur skåpet och får stå framme tills de har uppnått rumstemperatur innan testet påbörjas. Ett python skript styr spänningkällan som analogt styr lasten. Denna ser till att 15 W dras i 2 sekunder och sedan 3 W i 30 sekunder för att till sist stängas av. Spänningens urladdningskurva mäts med multimetern.



Figur 3.3: Uppkoppling för effektkrav 1 och 2. För att kunna styra lasten externt måste LD300 bl.a. vara satt till external ttl.

Effektkrav fyra veckor

Detta test kommer fortgå under fyra veckor och har som uppgift att undersöka om läckströmmen sjunker tillräckligt för att klara effektkrav 3 (tabell 1.1). Då lasten ej kan användas för så låga laster som $25 \mu\text{W}$, då denna har 1 W noggrannhet behövs en annan metod för detta test. Superkondensatorkretsarna laddas upp till spänningsnivån från simuleringen som kretsen antas ha efter effektkrav 1 och 2. Ett motstånd på $230,4 \text{ k}\Omega$ monteras mellan kretsens plus och minus och ställs sedan i rumstemperatur. Spänningen mäts en gång per vardag. Motståndsvärdet har beräknats för att ge ett medelvärde. För att få fram detta värde beräknas först hur mycket energi som finns vid $3,4 \text{ V}$.

$$E = \frac{C_{total} * V^2}{2} = \frac{30 * 3,4^2}{2} = 173,4 \text{ Joule} \quad (3.1)$$

För att få fram ett medelvärde kommer effektkravet att beräknas på halva den tillgängliga energin.

$$E_{medel} = \frac{E}{2} = \frac{173,4}{2} = 86,7 \text{ Joule} \quad (3.2)$$

Att beräkningar görs på energi och inte spänning beror på att spänningskurvan är exponentiell, se figur 2.13.

För att få ut vid vilken spänning man har denna energi används ekvation $E = \frac{C * V^2}{2}$.

$$V = \sqrt{\frac{2 * E_{medel}}{C_{total}}} = \sqrt{\frac{86,7 * 2}{30}} = 2,4 \text{ Volt} \quad (3.3)$$

Strömmen räknas sedan ut.

$$I = \frac{P}{V} = \frac{25\mu}{2,4} = 1 * 10^{-5} \text{ Ampere} \quad (3.4)$$

Vilket ger oss motståndsvärdet.

$$R = \frac{V}{I} = \frac{2,4}{1 * 10^{-5}} = 230400 \Omega \quad (3.5)$$

För att få detta värde seriekopplas 390Ω , $220 \text{ k}\Omega$, $10 \text{ k}\Omega$ motstånd.

3.4.5 Övriga mätningar

Oscilloskop samt logikanalysator finns att tillgå för enstaka mätningar om det skulle behövas, dessa kan dock inte användas under hela test perioden.

4

Resultat

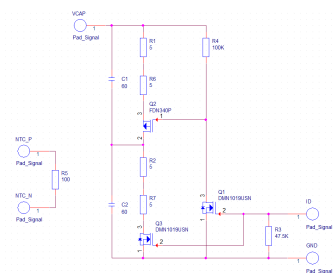
Resultaten för simulering av balanseringsmotstånd, Konstruktion av krets, Livslängdtest, mätningar av kapacitans samt ESR, balansering, påverkan av spänningsättningstid samt effektkrav presenteras i detta kapitel.

4.1 Konstruktion av krets

Kretsschema, PCB samt den färdiga produkten presenteras i detta avsnitt.

4.1.1 Kretsschema

Kretsschemat från OrCAD ses i figur 4.1. Tillhörande komponentlista ses i tabell 4.1.



Figur 4.1: Bild på kretsschema av system. R5 är ett NTC motstånd som ej kommer användas, dock skall det förberedas för denna. Av denna anledning finns ej denna med i BOM

4.1.2 PCB

Det beslutades att de flesta komponenterna skall sättas på bottenlagret för optimal placeringsyta. De enda komponenterna som beslöts sättas på topplaget var superkondensatorerna eftersom de tog majoriteten av ytan. Footprints

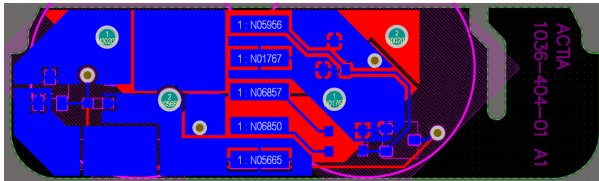
BOM

Tabell 4.1: Lista över komponenterna från figur 4.1.

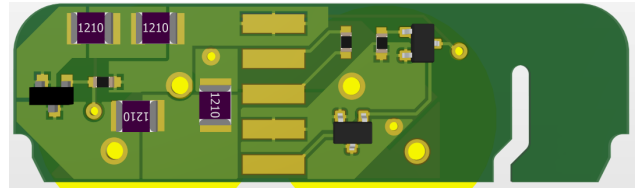
Komponent	Artikelnummer	Antal	Värde
Superkondensator	TV1840-3R0606-R	2	60 F
Resistor	ERJ14YJ5R6U	4	5,6 Ω
Resistor	MCWR06X4752FTL	1	47,5 k Ω
Resistor	MCWR06X1003FTL	1	100 k Ω
Transistor	DMN1019USN	2	
Transistor	FDN340P	1	

kommer ej att redovisas i denna rapport.

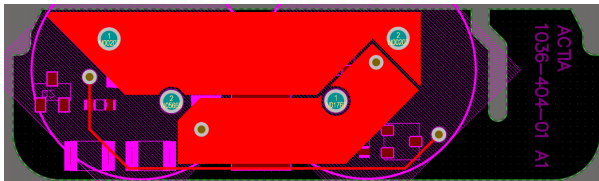
“Polygon pour” (är en funktion i Altium Designer för att fylla tomma oanvända områden på kretskortet med koppar) användes för att distribuera värmen jämnt. Dessa kan noteras på de större koppar-ytorna som kan ses på figurerna 4.2 och 4.4. Om kopparen skulle vara för tunn skulle kopplingen riskeras att brännas bort vid hög ström.



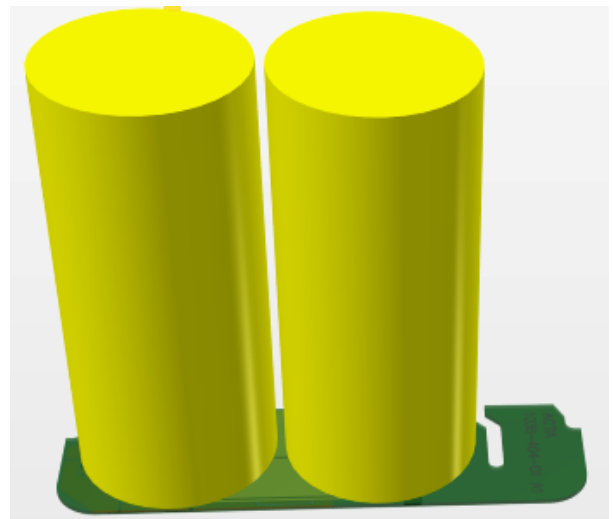
Figur 4.2: Bild på PCB dokument. Blå är bottenlager och röd är topplager.



Figur 4.3: 3D vy av PCB bottenidan.



Figur 4.4: Bild på PCB dokument med hänseende till topplager. De lila cirkulära areorna är ytan som superkondensatorerna tar. Man kan även se övriga komponenter från bottenlagret.

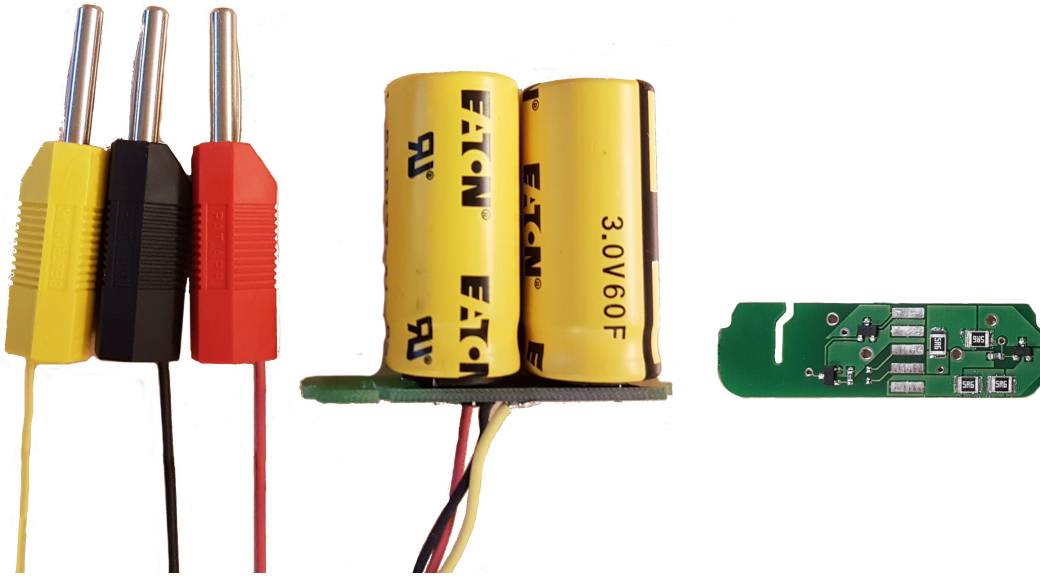


Figur 4.5: En 3D-rendering av PCB där superkondensatorerna volym kan ses och jämföras med kretskortets storlek.

Vid leverans upptäcktes att footprint 1210 för balanseringsmotstånden saknade lagret bottom paste, paste mask extension var för liten, vilket medförde att stencilen ej hade med dessa. Detta löstes genom att manuellt lägga på pastan på dessa ytor efter stencilen. Komponenterna sattes sedan på plats, när detta var klart stoppades korten in i ugnen.

4.1.3 Färdig krets

Den färdiga kretsen kan ses på figur 4.6 där både färdig krets och test uppsättning med kablage demonstreras.



Figur 4.6: Till vänster kan ses den färdiga kretsen med superkondensatorer samt kablage. Signal för spänningsbalansering (gul 1 V), ground (svart) och laddningspänning (röd 4,5 V). Till höger kan den färdiga bottenlager ses.

4.2 Test

Hur testerna i temperaturskåpet, mätningar av ESR och kapacitans samt hur effekttesterna utförts enligt valda metoder samt resultaten från dessa redovisas i detta avsnitt.

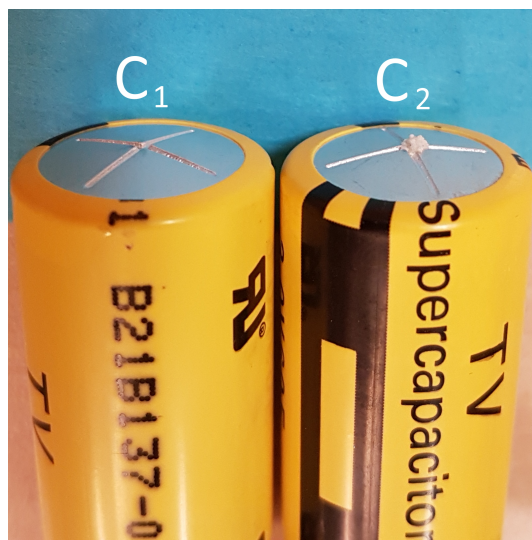
4.2.1 Kretsar

Totalt fanns 16 kretsar som användes för testerna varav 10 stycken testades i temperaturskåp och fyra stycken undergick fyra veckors effekt testet. Kretsnumren 1 till 10 testades med konstant hög temperatur medan fyra veckors effekt testet testades i rumstemperatur. Se tabell 4.2 för uppdelning av tester på kretsarna.

Tabell 4.2: Kretsar som användes under testerna.

Kretsnummer	Typ av test	Spänning i temperaturskåp	Initial spänningsvärde
1	Temperaturskåp	4,5	-
2	Temperaturskåp	4,5	-
3	Temperaturskåp	4,5	-
4	Temperaturskåp	4,5	-
5	Temperaturskåp	4,5	-
6	Temperaturskåp	5	-
7	Temperaturskåp	5	-
8	Temperaturskåp	5	-
9	Temperaturskåp	5	-
10	Fyra veckors effekt test	5	3,4
11	Fyra veckors effekt test	-	3,4
12	Fyra veckors effekt test	-	3,4
13	Generella tester	-	-
14	Fyra veckors effekt test	-	3,4
15	Fyra veckors effekt test	-	3,4
Test	Generella tester	-	-

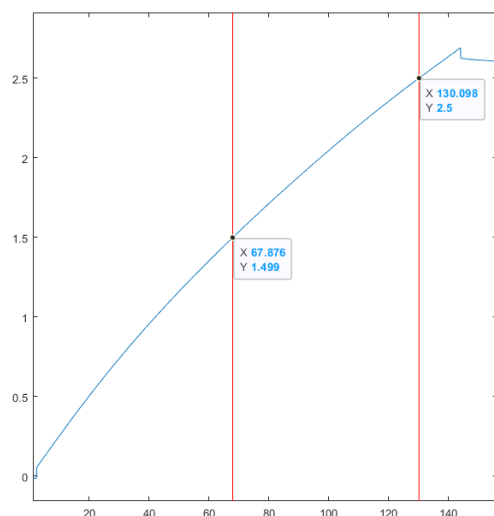
Det noterades att på kretsarna 6-10 började kondensator C_2 att läcka i den övre delen efter ungefär 150 timmar i temperaturskåpet. 5 V applicerad spänning under en längre tid i 85°C medförde en väsentlig skillnad jämfört 4,5 V. Detta hände inte C_1 . Notera dock att 2 första test dagarna i temperaturskåpet användes 6 V istället för 5 V. Det beslutades att ändra spänning över kretsarna 6-10 eftersom de accelererande testerna påverkade alldeles för mycket, redan efter 2 dagar var den övre delen böjd.



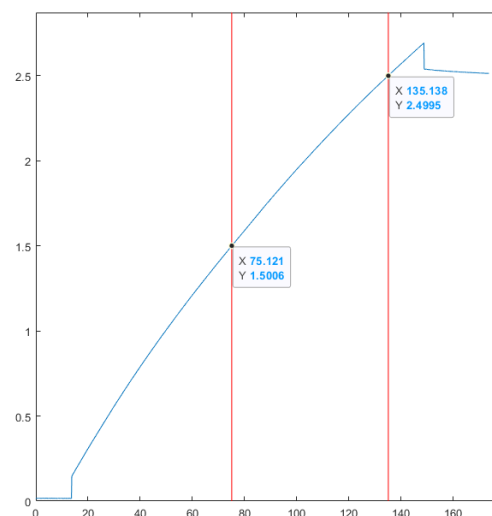
Figur 4.7: Bilden demonstrerar hur C_2 , på krets nummer 6, börjar läcka på ovensidan.

4.2.2 Kapacitans

Ett matlab-skript skapades för att plotta de erhållna mätvärdena samt praktiskt beräkna kapacitansen och ESR. För att mäta superkondensatorernas kapacitans, C , användes ekvationen $i = C * \frac{dV}{dt}$ och laddades upp med en konstant ström på 1 A. När spänningen nådde 1,5 V samt 2,5 V noterades tiden. Denna mätning gäller för en enskild superkondensator. Ekvationen skrevs om som $i \frac{dt}{dV} = C$ vilket innebär att kapacitansen är tidsskillnaden dt då både spänningsskillnaden dV och i är 1.

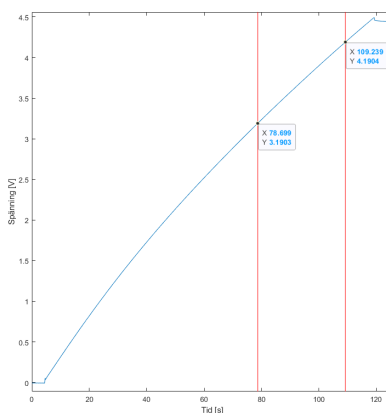


Figur 4.8: Uppladdning av test superkondensator 1 till 2,7 V med 1 A ström. Kapacitans mäts mellan 1,5 V och 2,5 V.
C: 62,22 F



Figur 4.9: Uppladdning av test superkondensator 2 till 2,7V med 1 A ström. Kapacitans mäts mellan 1,5 V och 2,5 V.
C: 60,02 F

För hela kretsen som innehåller två superkondensatorer mättes tidsintervallet vid en högre spänning. Spänningsvärden som noterades för hela kretsen var 3,19 V och 4,19 V. Detta bestämdes eftersom mätningarna från figur 4.8 och figur 4.9 uppgav till en seriekopplad kapacitans nära motsvarande den kapacitans som erhöles i figur 4.10. Den seriekopplade kapacitansen räknades enligt: $\frac{C_{test,1}C_{test,2}}{C_{test,1}+C_{test,2}} = \frac{60,02 \cdot 62,22}{60,02+62,22} \approx 30,55 \text{ F}$.



Figur 4.10: Uppladdning av både test superkondensator 1 och 2 i serie. Uppladdning till 4,5 V med 1 A ström. Kapacitans mäts mellan 3,19 V och 4,19 V. C: 30,54 F

RS-232 vs GPIB

RS-232 medförde att vi fick omkring 8 samples per sekund medan GPIB gav runt 150 samples per sekund. Mätningarna med RS-232 blev därför mindre noggranna och jämförelse görs i tabell 4.3.

Kretsnummer	RS-232	GPIB	Skillnad
6	26,012 F	25,832 F	0,180 F
8	26,136 F	26,013 F	0,123 F
9	26,471 F	26,216 F	0,255 F
10	26,128 F	25,892 F	0,236 F
13	30,900 F	30,882 F	0,018 F

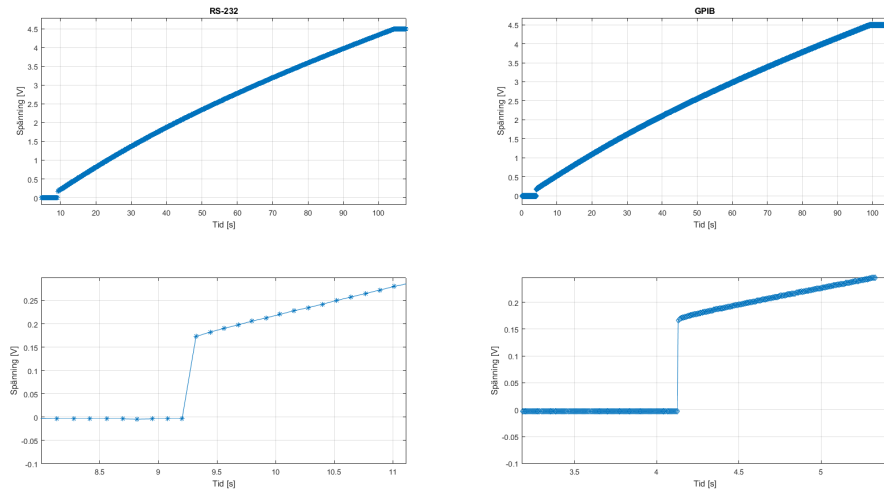
Tabell 4.3: Jämförelse mellan RS-232 och GPIB gränssnitt i kapacitans mätningar. Skillnaden varierar på grund av att RS-232 gav för lite mätpunkter.

4.2.3 ESR

Hur ESR togs fram under testerna redovisas i detta avsnitt.

Metod 1 - EATON

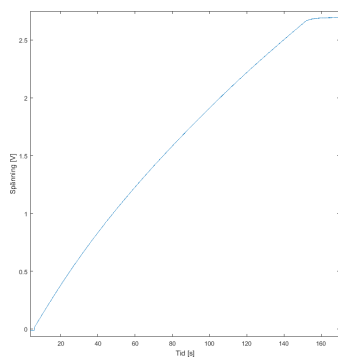
Vid användning av matlabskriptet samt RS-232 noterades det att Agilent 34401A inte kunde sampla tillräckligt fort för att få tillförlitliga ESR värden. ESR verkade vara för högt. Byte gjordes från RS-232 till GPIB. Detta gjorde att mätningarna gick från cirka 8 mätningar per sekund till ungefär 150 mätningar per sekund. Skillnaden mellan RS-232 och GPIB kan ses på den undre delen av figur 4.11. Detta är dock inte de 1000 samples per sekund som minimalt krävs.



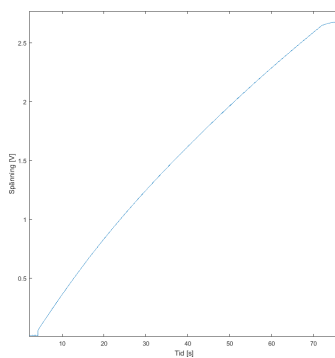
Figur 4.11: Synlig skillnad mellan sample-rate hos RS-232 och GPIB.

I mätinstruktionerna från EATON står att vid lågt ESR kan strömmen behöva ökas. Försök till detta redovisas i figurerna 4.12, 4.13 och 4.14. För uträkning av ESR användes ekvation 4.1.

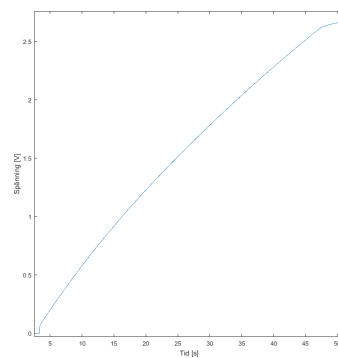
$$\text{ESR} = \frac{\text{Initial spänningssteg}}{\text{Laddningström}} \quad (4.1)$$



Figur 4.12: Uppladdning med 1 A.
 $C = 64,49 \text{ F}$
 $ESR = 0,016$



Figur 4.13: Uppladdning med 2 A.
 $C = 30,33 * 2 = 60,66 \text{ F}$
 $ESR = \frac{0,0199}{2} = 0,00995$

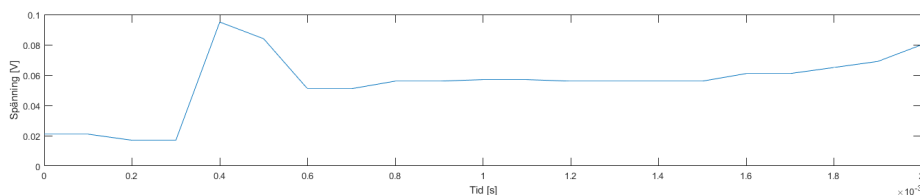


Figur 4.14: Uppladdning med 3 A.
 $C = 19,95 * 3 = 59,85 \text{ F}$
 $ESR = \frac{0,0346}{3} = 0,0115$

Mätning av ESR med logikanalysatorn

Då GPIB ej kunde komma upp i tillräcklig samplingsrate gjordes mätningar med logikanalysatorn se figur 4.15.

Resultatet blev ej bättre än med GPIB. En återskapad illustration av mätningen kan ses på figur 4.15, där det blir svårt att avläsa ESR på grund av översläng.



Figur 4.15: Approximativ representation av logikanalysator-mätning med 5k samples per sekund.

Metod 2 - Urladdningskurva

En metod att få en ESR mätning bestod utav att mäta spänningsfallet som sker efter uppladdning. [ESR rapport] Det testades med att spänningssätta en test kondensator under en viss tid och sedan ladda ur den med konstant ström. Olika spänningssättningstider användes för att testa den. Resultatet kan ses i tabell 4.4. Uträkning av ESR skedde genom ekvationen $ESR = \frac{(V_2 - V_1)}{3} - 0,14$. 0,14 subtraheras för att inte räkna med resistansen i kablagen i uträkningarna.

Test	Tid [Minuter]	Uträknad ESR värde
1	1	0,0048
2	2	-0,0097
3	2	-0,0090
4	2	-0,0080
5	5	-0,0060
6	10	-0,0202
7	10	-0,0103
8	10	0,0030
9	10	-0,0101
10	30	-0,0070

Tabell 4.4: Olika spänningssättningstider för att eftersträva ESR-värden. Samma kondensator användes under alla tester. Olika ESR värden indikerar att denna metod är opålitlig samt att en negativ ESR-värde är orealistisk.

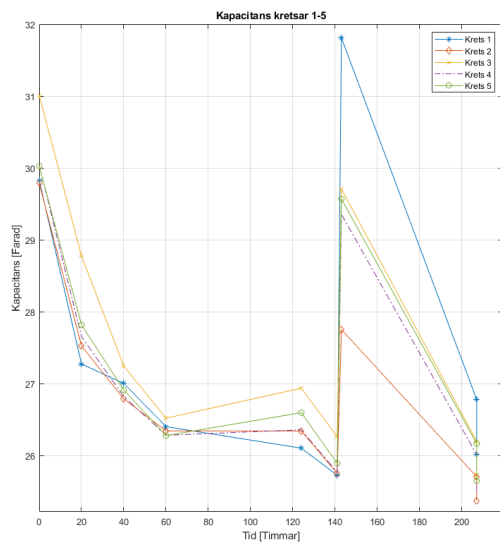
Notera att sampling hastigheten är runt 146 samples per sekund vilket inte är tillräckligt.

4.2.4 Livslängdstest

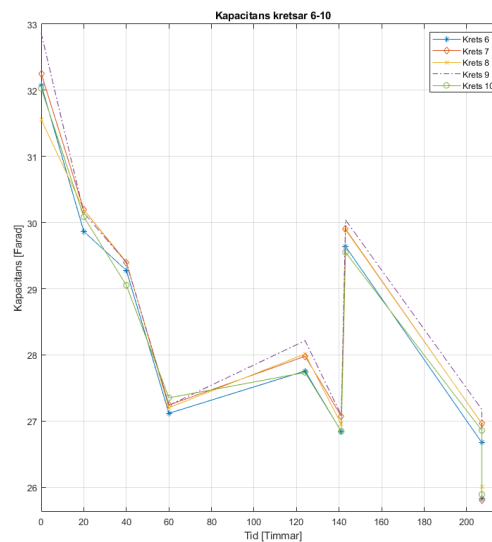
Kretsarna lades in i temperaturskåpet under konstant temperatur samt spänningssatta under konstant spänning, med 0,2 A för att ungefärligt efterlikna den verkliga applikationen. Kretskorten med numren 1 till 5 spänningssattes med 4,5 V medan numren 6 till 10 spänningssattes med 5 V.

Kapacitans

Kapacitansen sjönk under de accelererande testerna, ses i figur 4.16 och figur 4.17 .



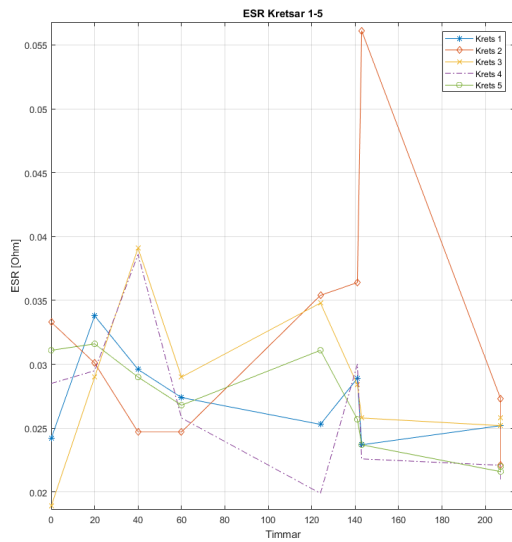
Figur 4.16: Kapacitansförändring över tid för kretsarna 1 till 5.



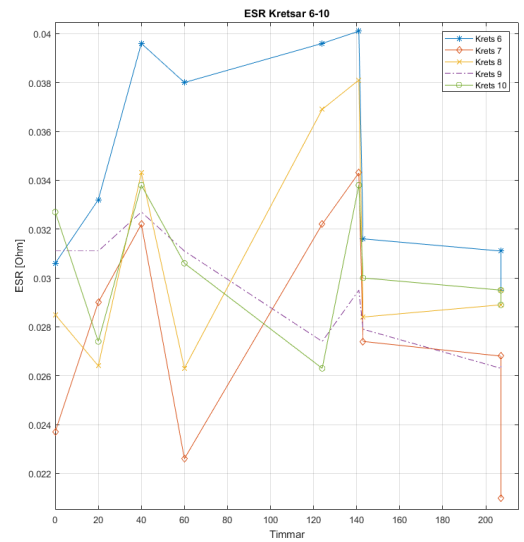
Figur 4.17: Kapacitansförändring över tid för kretsarna 6 till 10.

ESR

Resultatet för ESR kan ses på figur 4.18 och figur 4.19.



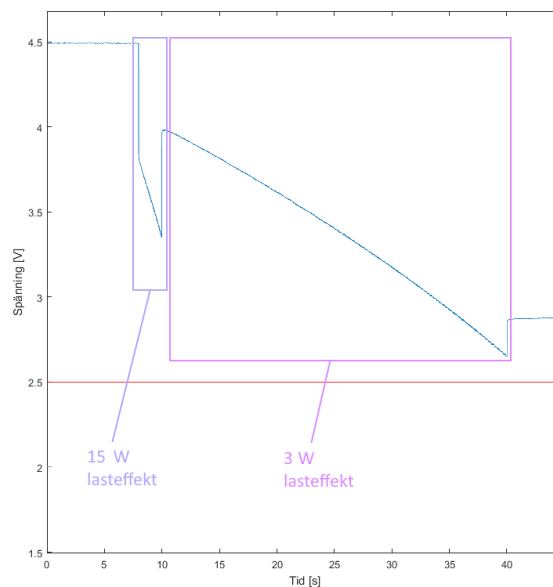
Figur 4.18: ESR över tid för kretsarna 1 till 5.



Figur 4.19: ESR över tid för kretsarna 6 till 10.

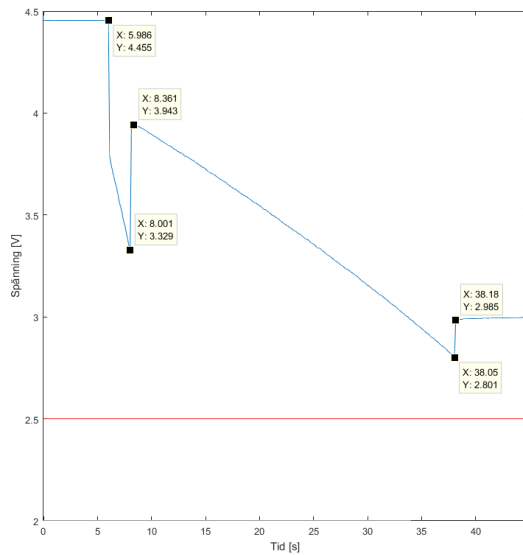
Effekttest

Effekttesterna blev till en referens ifall kretsarna fortfarande är dugliga efter exponering för hög temperatur samt kontinuerligt spänningsatta. Kravet för att de ska klara av denna typ av test är att spänningen håller sig över 2,5 V. Testet börjar med effektkrav 1 och slutar med effektkrav 2 vilket demonstreras på figur 4.20.

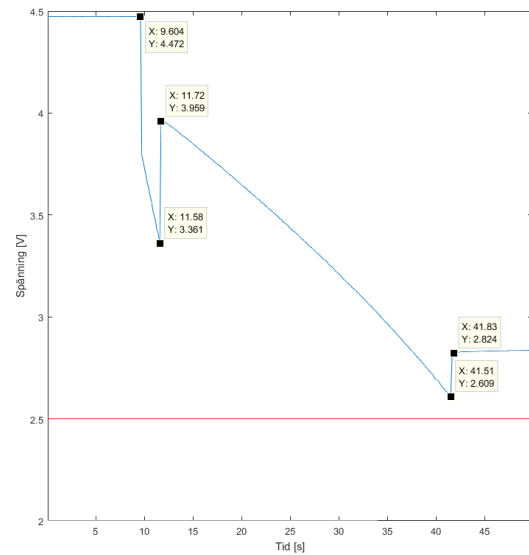


Figur 4.20: Effekttesten utför en 15 W lasteffekt och 3 W lasteffekt.

Effekttesterna appliceras på kretsarna som har varit i temperaturskåpet och det noterades att det förekommer en skillnad på laddningshållning beroende på timmar i temperaturskåpet. Detta kan ses på figur 4.21 och figur 4.22.



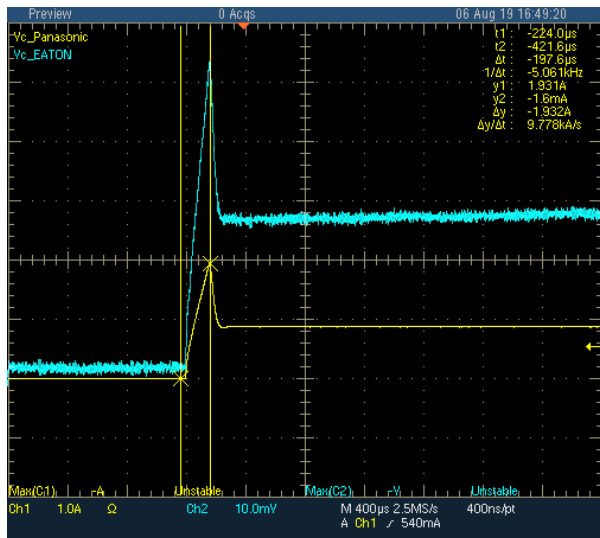
Figur 4.21: Effekttest på krets 2 efter 60 timmar i temperaturskåpet.



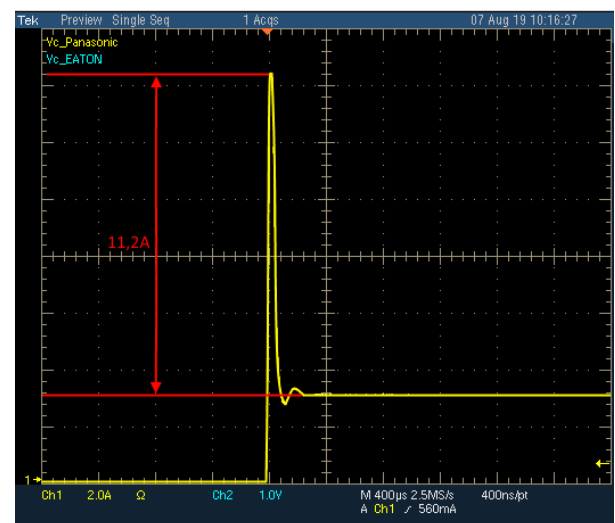
Figur 4.22: Effekttest på krets 2 efter 143 timmar i temperaturskåpet. Trots att den börjar på högre spänning än figur 4.21 faller spänningen närmare minimum spänningen 2,5 V.

Instrument

Det noterades att TTI PL303QMD-P gav en spik på nästintill 2 A när den sattes till 1 A. Detta förekom under de 200 μ s när kretsen laddas och påverkar ESR mätningarnas resultat. På liknande sätt påverkade LD300 effektrav testen, där spiken är på 11,2 A högre än vad den bör vara, och stabiliseras efter 1200 ns.



Figur 4.23: Gula grafen: Ström spik på 2 A.

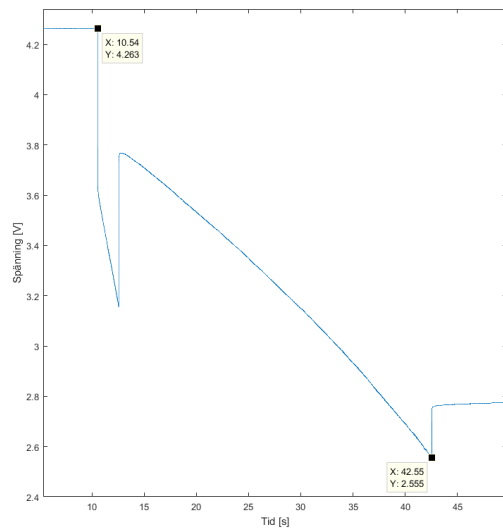


Figur 4.24: LD300 översläng.

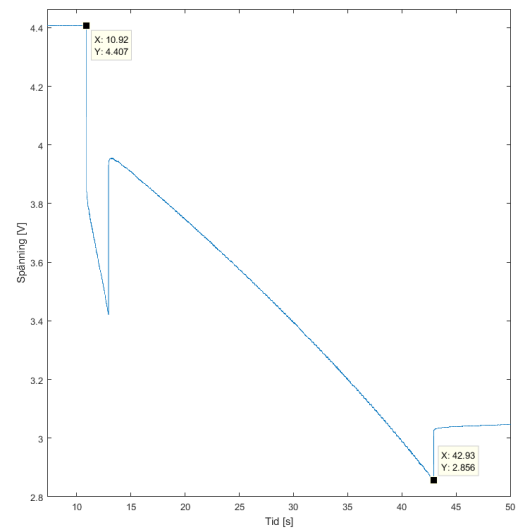
Spänningssättnings tid

Hur länge kretsen har haft tillgång till en strömkälla påverkar hur bra effektkravet klaras se figur 4.25 och figur 4.26. Tester utfördes vars strömkällan är påslagen ytterligare tid efter att kretsen nått 4,5 V. När kretsen hölls

spänningssatt 2 respektive 10 ytterligare minuter granskades en marginal. Marginalen mellan testerna blev 0,301 V.



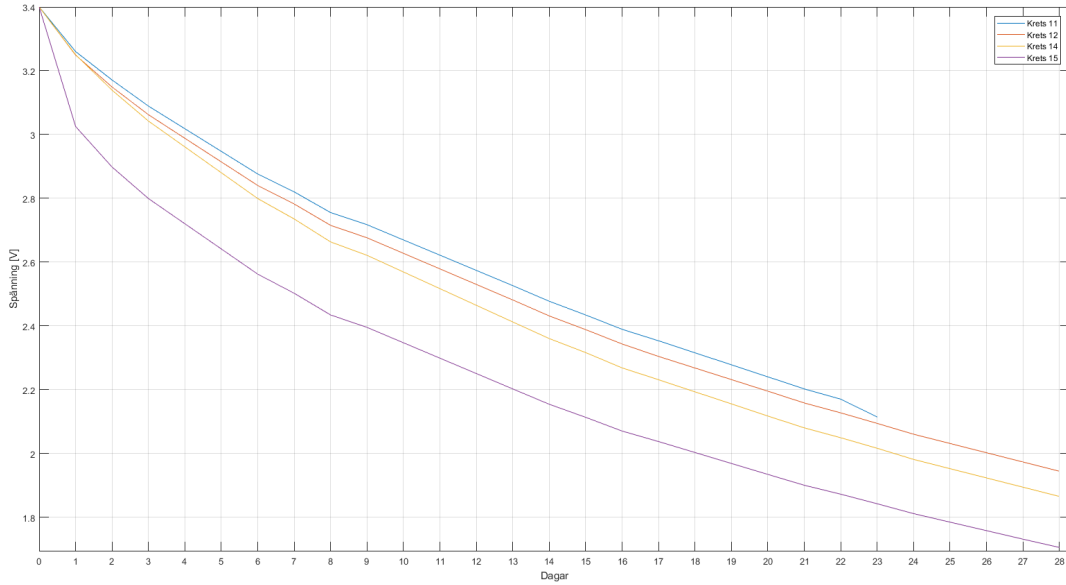
Figur 4.25: Kretsen spänningssattes 2 minuter ytterligare efter fullladdning. Efter effektkrav 1 samt effektkrav 2 sjönk spänningen till minst 2,555 V.



Figur 4.26: Kretsen spänningssattes 10 minuter ytterligare efter fullladdning. Efter effektkrav 1 samt effektkrav 2 sjönk spänningen till minst 2,856 V.

4.2.5 Effektkrav 3

Kretsarna klarade av effektkrav 3 med bra marginal. Testet börjar från 3,4 V eftersom detta var den ungefärliga simulerade värdet som erhöles efter effektkrav 1 och 2. Krets 11 kortslöts tillfälligtvis på dag 24 och således finns inte fullständiga grafen. Genom mätningarna syns det att de klarar 1 V kravet med bra marginaler från 3,4 V start. Graf med spänning över dagar presenteras på figur 4.27.



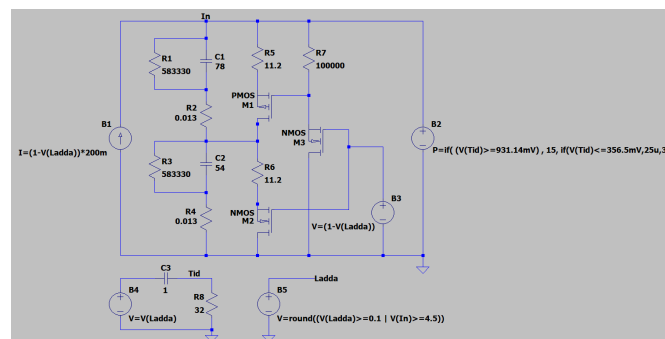
Figur 4.27: Graf över hur kretsarna presterade på effektkrav 3.

4.3 Balansering av krets

Simulering av balanseringsmotstånd presenteras, följt av resultaten från mätningar på hela kretsen med och utan balansering.

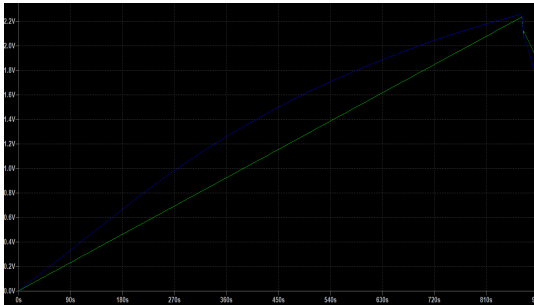
4.3.1 Simulering

Kretsschemat för simulering av balanseringsmotstånd ses i figur 4.28. Graferna över uppladdningskurvorna från LTSpice ses i figur 4.29 - figur 4.32.

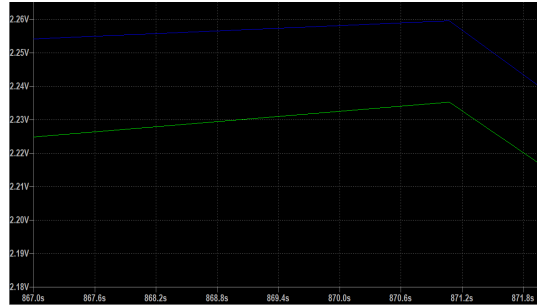


Figur 4.28: Kretsschema för simulering utav system i LTSpice.

Lägre motståndsvärde ger snabbare ändring av spänningen då högre ström kan passera igenom balanseringsmotstånd. Ett värde på $11,2 \Omega$ visade sig vara lämpligt då skillnaden i spänning vid fulladdning var under 0,02 V, ses i figur 4.28, vilket ger en maximal livslängds skillnad på 10%.



Figur 4.29: Graf från LTspice som visar spänningen över superkondensatorerna under uppladdning med $11,2 \Omega$ motstånd.



Figur 4.30: Förstoring av spänningsskillnaden (figur 4.29 efter uppladdning med $11,2 \Omega$ motstånd) visar en skillnad på $0,02 \text{ V}$.



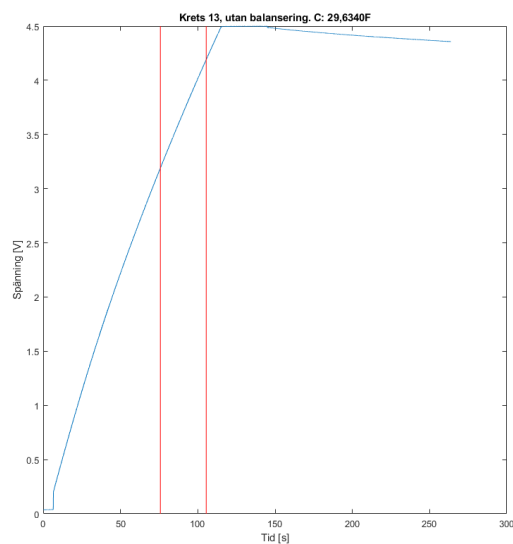
Figur 4.31: Graf från LTspice som visar spänningen över superkondensatorerna under uppladdning vid balansering med $5,6 \Omega$ motstånd.



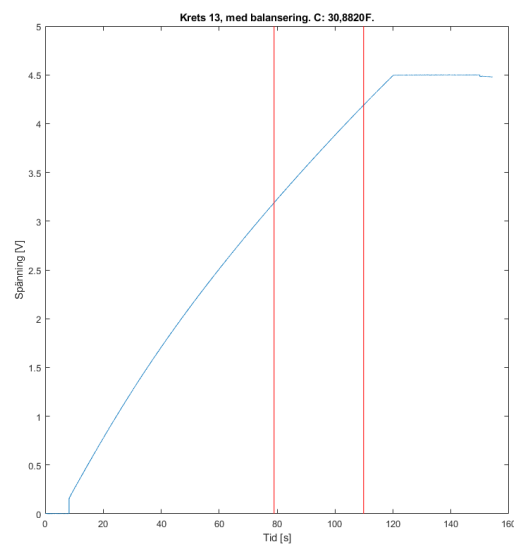
Figur 4.32: Graf från LTspice som visar spänningen över superkondensatorerna under uppladdning vid balansering med 500Ω motstånd.

4.3.2 Mätningar

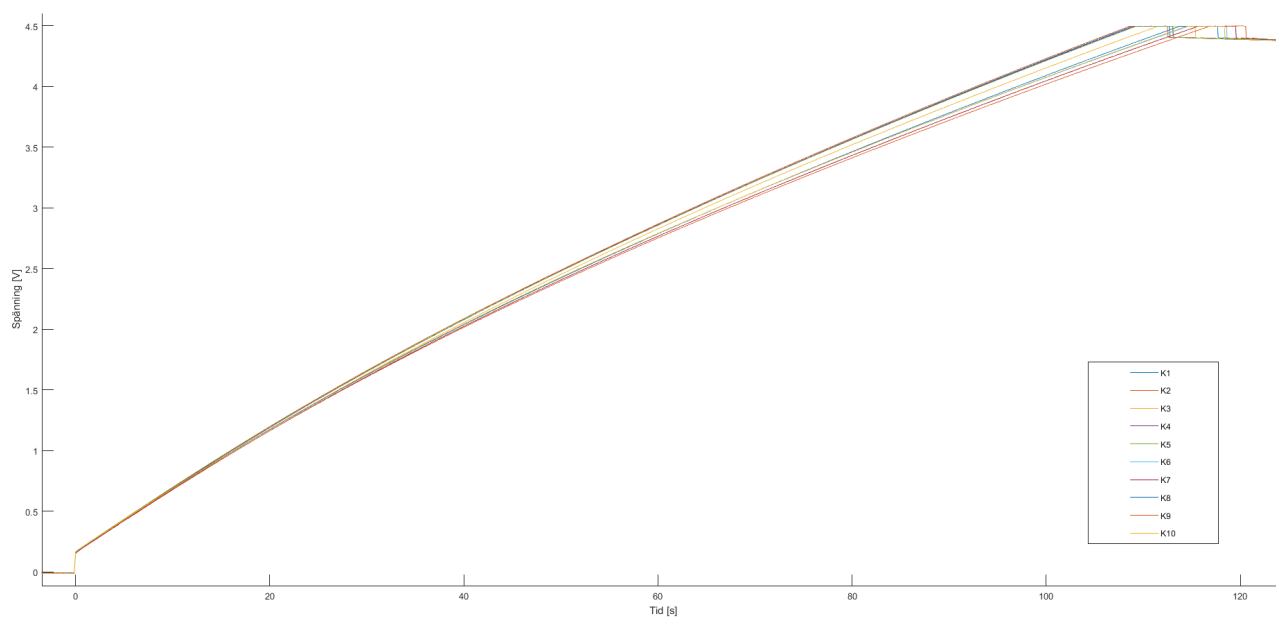
Lutningen på kurvan i graferna skiljer sig ifall kretsen är med eller utan balansering. Detta ses i graferna figur 4.33 och figur 4.34.



Figur 4.33: Graf över uppladdningskruvan utan balansering på.

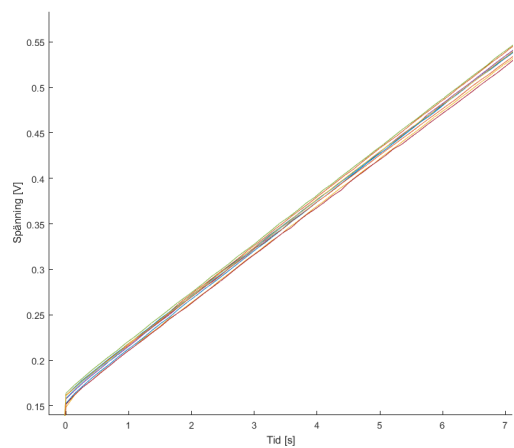


Figur 4.34: Graf över uppladdningskruvan med balansering på.

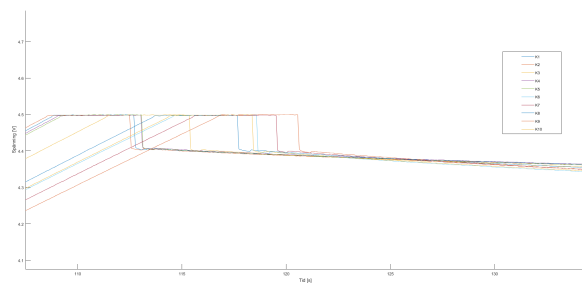


Figur 4.35: Kretsar 1 till 10, mätning 16-07-2019. Demonstrerar skillnaden mellan kretsarna under uppladdning.

Demonstration över hur laddningstiden och lutningen varierar mellan alla kretsar kan ses på figur 4.35. Variation i uppladdningens start-lutning kan ses på figur 4.36 och färdigladdade figur 4.37.



Figur 4.36: Inzooming av figur 4.35 startuppladdning.



Figur 4.37: Inzooming av figur 4.35 laddade 4,5 V.

5

Diskussion

I detta kapitel diskuteras resultaten, slutsatsen presenteras under kapitel slutsats.

5.1 Metod

Det som bidrog till att önskat resultat ej uppnåts var val av strömkälla. Detta missades helt i val av metod. Eftersom denna genererar en strömspik som det ej togs hänsyn till så spelade det ingen roll att de andra metoderna var väl valda. Ett alternativ hade varit att placera $1\ \Omega$ motstånd vid utgången, mäta spänningen och sen räkna ut strömmen. Detta antas ha slätat ut strömkurvan. Ett annat alternativ hade varit att använda sig av ett batteri med en switch. Detta hade fått strömkurvan att komma så nära ideal som möjligt, vilket antas hade resulterat i mer korrekta mätvärden.

Det fanns många metoder att välja mellan när det kom till att få ut ESR och C värdena, vilka var grunden för hela experimentet. Anledningen att valet föll på tillverkarens metod var för att ingen information om exakt vilka material/ämnen som används i just denna superkondensator angetts av tillverkaren, och då är det svårt för någon utifrån att bedöma bästa metod utan en spektrum analysator till hands som kan användas som facit. Därför utgår vi ifrån att tillverkaren har kommit fram till att detta är den mest tillförlitliga metoden.

Hade detta gjorts om så hade inte benen på superkondensatorerna klippts av så kort på kretskortet. Detta hade möjliggjort att kablaget inte hade behövts räknas bort vilket hade gett mer korrekta resultat samt hade gjort arbetet smidigare.

5.2 Konstruktion av krets

5.2.1 PCB

Stencilen hade inte med balanseringsresistorerna (footprint 1210 saknade bottom paste) vilket medförde extra arbete för att få lödpasta på rätt plats på en liten yta. Detta arbete skulle ha reducerats ifall vi hade lagt märke till att paste mask expansion var fel inställd på Altium.

5.2.2 Lödning

Lödningen kan ha påverkat ESR samt kapacitansen. EATON rekommenderar inte att man löder manuellt. Om man löder manuellt bör det vara 350 °C inom 4-5 sekunder. Detta noterades sent då superkondensatorerna löddes fast med 450 °C mer än 10 sekunder. Kapacitansen och ESR borde mätits innan lödning.

5.2.3 Simulering

Simuleringar för 1 A borde ha gjorts för att dimensionera balanseringen för detta.

5.3 Test

3 V per cell (6 V per krets) påverkade superkondensatorerna rejält, kunde ses på böjd övre-del i sidvy (figur 4.7).

POWER SUPPLY PL303QMD-P ger en output på $-13,4\text{ mV}$ när, output är avstängd, vilket bidrar till en mätningsskillnad. Samt att den ger en strömspik när den sätts på, vilket är en huvudsaklig felkälla.

5.3.1 Balansering

Tester med 1A laddningström med, samt utan, spänningsbalansering skiljde kapacitansen 4,04% på krets nummer 13. Samma tester gjordes på krets nummer 6 och det noterades att kapacitansen skiljer sig 0,6%. Detta beror på att kapacitansen hos en enskild superkondensator har toleransen -10% till +30% enligt tillverkaren.

5.3.2 Kapacitans mätning

Superkondensatorerna var dock väldigt temperaturkänsliga och bidrog till att mätningarna ej blev konsistenta. Det rekommenderas därför att mätningen av kapacitans utförs då kretsarna fortfarande är i temperaturskåpet vilket ej bör ge missvisande kapacitansvärden under mätning.

Att den stiger (figur 4.16 & figur 4.17) beror säkerligen på att vi lät kretsarna vila och vara i rumstemperatur tillräckligt länge. Värmen påverkar kapacitansen på sådan sätt att den sjunker [23]. Därför borde mätningarna ha inträffat vid samma tider (t.ex. låta de svalna exakt 3 timmar, utföra effekt mätningar och ladda ur kretsarna, kortsluta de lika lång tid, utföra uppladdning därefter, varje gång). Med andra ord borde mätningar skett med större noggrannhet.

5.3.3 ESR mätning

Mätningarna blev näst intill slumpmässiga på grund av bristfällig noggrannhet i instrumenten och för lite samples per sekund. En digital multimeter rekommenderas inte att användas, istället bör en oscilloskop användas med väldigt hög sample-rate och precision.

Fördelen med EATONs metod att mäta ESR är att nominell spänning inte måste uppnås på superkondensatorerna. Däremot måste de urladdas minst 15 minuter innan mätningen.

En annan metod gick ut på att ladda superkondensatorerna till nominell spänning och mäta fallet efter uppladdning. Metoden innebär att de ska vara laddade under en viss tid. Nackdelen är att metoden kan riskera att superkondensatorerna åldras baserat på hur länge man låter de vara laddade på nominell nivå.

5.3.4 Effektkrav 3

Effektkravet klarades men detta var vid rumstemperatur. För fyra veckors testet saknades 10 Ω för att komma upp i det beräknade värdet. Detta anses dock inte ha påverkat resultaten då detta är väldigt lite i jämförelse med det totala resistansvärdet. Vad det innebar var att en liten andel mer ström användes vilket är positivt för resultaten då detta visar att fyra veckors effektkraven klarades med marginal.

5.3.5 Livslängd

En temperaturprofil, samt medelvärde på spänning, skulle kunna användas för att uppskatta livslängden dynamiskt. Dock erhöles inget temperaturprofil men en antagande är att med en medelvärde på temperatur per månad med konfidensintervall som tar hänsyn till variationer i medelvärde kan appliceras.

5.3.6 Sampling

GPIB

Möjligen skulle det fungerat att sätta multimetern på address 31 (talk-only läge) med GPIB och få fler samples per sekund. Men detta lyckades inte under testerna.

5.3.7 Källkritik

De flesta källorna är vetenskapliga samt har en hög kvalitet, och är därav pålitliga. Mycket forsknings relaterat. Vissa webblänkar som källor kan ses som lite lägre nivå av pålitlighet, t.ex. bloggar. Källor från själva tillverkaren bör vara pålitliga dock kan det förekomma situationer då tillverkaren testat produkten för att ett särskild sätt för att förstå av bra värden, dvs att vissa sådana källor kan vara vinkade för marknadsföring.



Slutsats

6.1 Framtida arbete

För framtida studier eller exjobb rekommenderas att man innehar bra verktyg samt bra etablerade metoder för ESR mätningar. Metoder diskuteras i avsnitt 5.1. Dessa bör användas innan, och efter, man löder superkondensatorerna för att upptäcka om värdena ändras.

6.2 Sammanfattning

Syftet med detta arbete var att undgå batteribyte genom att ersätta en befintlig energikälla med superkondensatorer. Detta anses möjligt då alla effektkraven gick att tillmötes gå. Det finns även exempel där andra har lyckats implementera detta. Det som måste tas i beaktande är om upp laddningstiden är rimlig samt hur lång tid produkten kommer vara utsatt för de mest extrema temperaturer i uppgett temperaturintervall. Frågetecknen som finns gäller alltså livstidskravet samt effektkraven vid de mest extrema temperaturerna. Slutsatsen är att det är mycket troligt att detta är en fungerande lösning som kommer uppnå målet med att slippa byta batterier men att testerna borde göras om enligt rekommendationerna i diskussionsavsnittet samt att data över förväntad temperatur över tid borde tas fram då det är just temperaturen som avgör om kraven kan uppfyllas.

References

- [1] O. S. Okwundu, C. O. Ugwuoke, and A. C. Okaro. Recent trends in non-faradaic supercapacitor electrode materials. *Metallurgical & Materials Engineering*, Vol 25, Iss 2, Pp 105-138, 2019.
DOI: 10.30544/417.
- [2] J. Both. Electrolytic capacitors, 1890 to 1925: Early history and basic principle. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 31, no. 1, pp. 22-29, 2015.
DOI: 10.1109/MEI.2015.6996675.
- [3] A. H. A. Rahim, N. Ramli, A. N. Nordin, R. Othman, W. Asrar, and E. Sulaeman. Classical equivalent circuit characterization double-layer capacitor. *IEEE 4th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Application (ICSIMA)*, pp. 1-6, 2017.
DOI: 10.1109/ICSIMA.2017.8312015.
- [4] Helena Berg. *Batteries for electric vehicles: materials and electrochemistry*. Cambridge University Press is part of the University of Cambridge, 2015.
- [5] A. Burrows, J. Holman, A. Parsons, G. Pilling, and G. Price. *Chemistry3: Introducing inorganic, organic and physical chemistry*. Oxford University Press, 2017.
- [6] *Basic Electrical Engg.* McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited, 2001. URL: <https://books.google.se/books?id=YjaSTinUjPEC>.
- [7] Faraday. Lectures on static or franklinic electricity, delivered before the royal institution. *Journal of the Franklin Institute*, 48(4):319-324, 1849.
DOI: 10.1016/0016-0032(49)90507-4.
- [8] Nationalencyklopedin. Kapacitans.
URL: <http://www.ne.se.e.bibl.liu.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/kapacitans>. [Besökt 2020-01-28].
- [9] J. Both. The modern era of aluminum electrolytic capacitors. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 31, no. 4, pp. 24-34, 2015.
DOI: 10.1109/MEI.2015.7126071.
- [10] Elisabet Ohlin. Omöjligt narkotikaklassa gbl och butandiol.
URL: <https://web.archive.org/web/20161121044537/http://ltarkiv.lakartidningen.se/2005/temp/pda30917.pdf>. [Besökt 2020-01-27].
- [11] Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Occupational Health Guideline for Dimethyl Acetamide.
URL: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/81-123/pdfs/0218.pdf>. [Besökt 2020-01-27].
- [12] Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Occupational Health Guideline for Dimethyl Formamide.
URL: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/81-123/pdfs/0226.pdf>. [Besökt 2020-01-27].
- [13] Passive Components Blog. Ripple current and its effects on the performance of capacitors.
URL: <https://passive-components.eu/ripple-current-and-its-effects-on-the-performance-of-capacitors/>. [Besökt 2020-01-27].
- [14] Nationalencyklopedin. Rippel.
URL: [https://www-ne-se.e.bibl.liu.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/rippel-\(2\)](https://www-ne-se.e.bibl.liu.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/rippel-(2)). [Besökt 2020-01-27].
- [15] Yves Bunet. *Energy Storage*. Wiley-ISTE, 2011.

- [16] X. Chang, D. Lei, S. Zhang, S. Li, and Y. Yang. Novel supercapacitor model parameter identification methods. *2017 2nd International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*, pp. 81-86, 2017.
DOI: 10.1109/ICPRE.2017.8390505.
- [17] Eaton. TV1840-3R0606-R (datablad), Augusti, 2016.
URL: <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/electronic-components/resources/data-sheet/eaton-tv-supercapacitors-cylindrical-cells-data-sheet.pdf>. [Besökt 2019-07-03].
- [18] R. German, A. Sari, P. Venet, Y. Zitouni, O. Briat, and J. Vinassa. Ageing law for supercapacitors floating ageing. *2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 1773-1777, 2014.
DOI: 10.1109/ISIE.2014.6864883.
- [19] R. Vellacheri, A. Al-Haddad, H. Zhao, W. Wang, C. Wang, and Y. Lei. High performance supercapacitor for efficient energy storage under extreme environmental temperatures. *Nano Energy*, Vol 8 pp. 231-237, 2014.
DOI: 10.1016/j.nanoen.2014.06.015.
- [20] B. E. Conway. *Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications*. Boston, MA : Springer US, 1999.
- [21] H. Gualous, R. Gallay, M. Al Sakka, A. Oukaour, B. Tala-Ighil, and B. Boudart. Calendar and cycling ageing of activated carbon supercapacitor for automotive application. *Elsevier Ltd*, 52, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2012.06.099>.
- [22] D. Linzen, S. Buller, E. Karden, and R.W. De Doncker. Analysis and evaluation of charge balancing circuits on performance, reliability and lifetime of supercapacitor systems. *IEEE*, 2003.
DOI: 10.1109/IAS.2003.1257768 [Besökt 2019-04-09].
- [23] M. Lu, F. Beguin, and E. Frackowiak. *Supercapacitors / materials, systems, and applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2013.
- [24] Eaton. Methods for measuring capacitance, inflow current, internal resistance and ESR, December, 2017. URL: <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/electronic-components/resources/technical/eaton-measuring-capacitance-inflow-current-internal-resistance-esr.pdf>. [Besökt 2019-07-03].
- [25] A. H. A. Rahim, N. Ramli, and A. N. Nordin. Fabrication and characterization of supercapacitor with activated carbon electrode and naoh electrolyte. *2018 7th International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE)*, pp. 1-6, 2018.
DOI: 10.1109/ICCCE.2018.8539340.
- [26] M. Uno and K. Tanaka. Accelerated charge-discharge cycling test and cycle life prediction model for supercapacitors in alternative battery applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics (Volume: 59 , Issue: 12 , Dec. 2012)*, Vol 59, no. 12, pp. 4704-4712, 2011.
DOI: 10.1109/TIE.2011.2182018.
- [27] B. Buergler, B. Faure, D. Latif, L. Diblik, P. Vasina, V. Gineste, and M. Simcak. Towards supercapacitors in space applications. *E3S Web of Conferences*, 16, 2017. p 17003
DOI: 10.1051/e3sconf/20171617003.
- [28] R. Kötz, P.W. Ruch, and D. Cericola. Aging and failure mode of electrochemical double layer capacitors during accelerated constant load tests. *JOURNAL OF POWER SOURCES*, Vol 195, no 3, pp. 923-928, 2009.
DOI: 10.1016/j.jpowsour.2009.08.045.
- [29] B. Veit, T. Hempel, A. Pohl, and M. Bodach. Investigations on life estimation of ultracapacitors using time domain methods. *International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices*, 2012.
DOI: 10.1109/SSD.2012.6197974.
- [30] P. Kreczanik, P. Venet, A. Hijazi, and G. Clerc. Study of supercapacitor aging and lifetime estimation according to voltage, temperature, and rms current. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 61, no. 9, pp. 4895-4902, 2014.
DOI: 10.1109/TIE.2013.2293695.

- [31] F. Schenkelberg. Creating meaningful derating graphics. *IEEE 2017 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, 2017.
DOI: 10.1109/RAM.2017.7889774.
- [32] Y. Diab, P. Venet, and G. Rojat. Comparison of the different circuits used for balancing the voltage of supercapacitors: Studying performance and lifetime of supercapacitors. *HAL Lyon 1 (University Claude Bernard Lyon 1)*, 2006.
- [33] V. Keshmiri, D. Westerberg, P. Andersson Ersman, M. Sandberg, Robert Forchheimer, and Deyu Tu. A silicon-organic hybrid voltage equalizer for supercapacitor balancing. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, Vol 7, no 1, pp 114-122, 2017.
DOI: 10.1109/JETCAS.2016.2612724.
- [34] E. H. El Brouji, O. Briat, J. Vinassa, N. Bertrand, and E. Woirgard. Impact of calendar life and cycling ageing on supercapacitor performance. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol 58, no 8, pp 3917-3929, 2009.
DOI: 10.1109/TVT.2009.2028431.
- [35] A. Bondarevs. Low power outdoor DC-UPS using supercapacitors. *Linköpings universitet*, 2014.
- [36] R. Negroiu, P. Svasta, A. Vasile, C. Ionescu, and C. Marghescu. Comparison between zubieta model of supercapacitors and their real behavior. *2016 IEEE 22nd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, pp. 196-199, 2016.
DOI: 10.1109/SIITME.2016.7777276.
- [37] P. Kreczanik, C. Martin, P. Venet, G. Clerc, G. Rojat, and Y. Zitouni. Constant power cycling for accelerated ageing of supercapacitors. *13th European Conference on Power Electronics and Applications*, pp. 1-10, 2009. [Besökt 2019-03-28].
- [38] A.B. Cultura and Z. Salameh. Modeling, evaluation and simulation of a supercapacitor module for energy storage application. *International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications*, 2015.
DOI: 10.2991/cisia-15.2015.235.
- [39] L. Zubieta and R. Bonert. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol 3, no 61, pp 199-205, 2000.
DOI: 10.1109/28.821816.
- [40] I. Jiya, N. Gurusinghe, and R. Gouws. Electrical circuit modelling of double layer capacitors for power electronics and energy storage applications: A review. *IEEE*, Vol 7 no 11, pp 268, 2018.
DOI: 10.3390/electronics7110268.
- [41] M. Uno and K. Tanaka. Single-switch cell voltage equalizer based on multi-stacked sepics for series-connected energy storage cells. *INTELEC 2011 - 2011 33rd International Telecommunications Energy Conference*, 2011.
DOI: 10.1109/INTLEC.2011.6099721.
- [42] LLC EETech Media. Resistor sizes and packages, 2019. [Besökt 2019-07-04].



Appendix

A.1 Agilent 34401A logger (RS-232)

```
from multimeter_34401A import Agilent34401A
import time
from datetime import datetime
import serial

file_index = input("Kort-index: ")
Num_reads = 0

enabler = open("enable.txt", "w")
enabler.write("0") #not 4.5 V
enabler.close()

print('initializing multimeter 34401A')
multimeter = Agilent34401A('COM1', 9600)
multimeter.resetConfiguration
multimeter.setup('VOLT10V')

now = datetime.now()
f = open("K"+str(file_index)+now.strftime("-%m-%d")+ ".txt", "a+")

while (True):
    voltageRead = (multimeter.read())
    print(voltageRead)
    voltcheck =float(voltageRead)
    voltcheck =format(voltcheck, '.10f')
    print(voltcheck)
    if voltcheck >= "4.49" :
        enabler = open("enable.txt", "w")
        enabler.write("1") #not 4.5 V
        enabler.close()
        now = datetime.now()
        f.write(now.strftime("%m/%d/%Y, %H:%M:%S.%f")[:-3]+" "+str(voltageRead)+'\n')
        whilebreaker = True
        break
    else:
        now = datetime.now()
        f.write(now.strftime("%m/%d/%Y, %H:%M:%S.%f")[:-3]+" "+str(voltageRead)+'\n')

for n in range(2000):
    voltageRead = (multimeter.read())
    now = datetime.now()
    f.write(now.strftime("%m/%d/%Y, %H:%M:%S.%f")[:-3]+" "+str(voltageRead)+'\n')
    print(voltageRead)

f.close()
```

A.2 Agilent 34401A logger (GPIB, Adress 21)

```
import visa
import time
from datetime import datetime

rm = visa.ResourceManager()
rm.list_resources()
('ASRL1::INSTR', 'ASRL2::INSTR', 'GPIB0::21::INSTR')
inst = rm.open_resource('GPIB0::21::INSTR')

file_index = input("Kort-index: ")

print("Connected: " + inst.query("*IDN?"))

now = datetime.now()
f = open("K"+str(file_index)+now.strftime("%m-%d")+ ".txt", "a+")

inst.write("*RST")
inst.write("*CLS")
inst.write("CONF:VOLT:DC 10")
inst.write("SAMP:COUN 1")
inst.write("DISP OFF")
inst.write("VOLT:RES MAX")
inst.write("VOLT:NPLC MIN")
inst.write("ZERO:AUTO OFF")
inst.write("VOLT:RANG:AUTO OFF")
inst.write("CALC:STATE OFF")
inst.write("TRIG:SOUR IMM")
inst.write("TRIG:DEL 0")

print(inst.query("READ?"))

while(True):
    now = datetime.now()
    f.write(now.strftime("%m/%d/%Y, %H:%M:%S.%f")[:-3]+" "+inst.query("READ?"))

f.close()
```

A.3 Python Uppladdnings skript

```
from multimeter_34401A import Agilent34401A
from test_power import Powersupply
import time
from datetime import datetime
import serial

# CHARGER SCRIPT

print('Powersupply on')
powersupply = Powersupply('COM5', 9600)
powersupply.resetConfiguration

powersupply.s.write('V1 4.5\r\n')
powersupply.s.write('V2 1\r\n')
powersupply.s.write('OP2 1\r\n')
powersupply.s.write('I1 1\r\n')
powersupply.s.write('OP1 1\r\n')

while (True):
    enabler = open("enable.txt", "r")
    voltcheck = enabler.read(1)
    enabler.close()
    if voltcheck == "1" :
        print("Shutting down powersupply")
        powersupply.s.write('OP1 0\r\n')
        powersupply.s.write('OP2 0\r\n')
        break
```

A.4 Python Effekt-last skript

```
from multimeter_34401A import Agilent34401A
from test_power_new_test import Powersupply
import time
from datetime import datetime
import serial

# WATT-LOAD

print('Powersupply on')
powersupply = Powersupply('COM6', 9600)

powersupply.s.write('OP1 1\r\n')
powersupply.s.write('OP2 1\r\n')

powersupply.s.write('V2 5\r\n')


print("Timer on, 15 watt")
start_time = time.time()
powersupply.s.write('V1 1\r\n')
powersupply.s.write('OP2 0\r\n')
time.sleep(2)
print("3 watt")
powersupply.s.write('V1 3\r\n')
time.sleep(30)
setup_time = time.time() - start_time
print("Att sätta båda tog: " + str(setup_time))

powersupply.s.write('OP2 1\r\n')
powersupply.s.write('OP1 0\r\n')
```

A.5 KEITHLEY 2015 THD logger (RS-232)

```
from multimeter_34401A import Agilent34401A
import time
from datetime import datetime
import serial

file_index = input("Kort-index: ")

enabler = open("enable.txt", "w")
enabler.write("0") #not 4.5 V
enabler.close()

print('KEITHLEY 2015 THD')
Kei = serial.Serial(port='COM1', baudrate=19200, timeout=4)
time.sleep(0.05)
print(Kei)
Kei.write("*RST\r\n")
time.sleep(0.025)
Kei.write("*CLS\r\n")
time.sleep(0.025)
response = Kei.read(1)
print(response)
Kei.write("*IDN?\r\n")
response = Kei.read(100)
print(response)

Kei.write(":CONF:CURR:DC\r\n")
time.sleep(0.025)
Kei.write(":SYSTEM:AZERO:STATE OFF\r\n")
time.sleep(0.025)
Kei.write(":SENSE:VOLT:DC:NPLC 0.01\r\n")
time.sleep(0.025)
Kei.write(":SENSE:VOLT:DC:RANGE 10\r\n")
time.sleep(0.025)
Kei.write(":SENSE:VOLT:DC:AVERAGE:STATE OFF\r\n")
time.sleep(0.025)
Kei.write(":TRIGGER:COUNT 1\r\n")
time.sleep(0.025)
Kei.write(":SAMPLE:COUNT 1\r\n")
time.sleep(0.025)
Kei.write(":TRIGGER:DELAY 0.0\r\n")
time.sleep(0.025)
Kei.write(":DISPLAY:ENABLE OFF\r\n")
time.sleep(0.025)

now = datetime.now()
f = open("K_KEI_"+str(file_index)+now.strftime("%m-%d")+ "_AMPERE_.txt", "a+")

while (True):
    time.sleep(0.01)
    Kei.write(":READ?\n")
    read = Kei.read(17)
    now = datetime.now()
    f.write(now.strftime("%m/%d/%Y, %H:%M:%S.%f")[:-3]+" "+read)
    print(read)
```



```
f.close()
```

A.6 Matlab plot log

```
clear all;
close all;
format long;

% Read file
id_string = "K5-08-07.txt"; %log-file name
fileID = fopen(id_string);
figure('Name', id_string, 'Position', [500 100 850 850]) % fixed position and size of window

C = textscan(fileID,'%u/%u/%u, %u:%u:%f %f');
fclose(fileID);

% get H-M-S
t(:,3) =C{1,6}(:,1);
t(:,1) =C{1,4}(:,1);
t(:,2) =C{1,5}(:,1);
% time in seconds
seconds = t(:,1) .* 60.*60 +t(:,2) .* 60 + t(:,3);
seconds2 = t(:,1) .* 60.*60 +t(:,2) .* 60 + t(:,3);
diff = seconds2 - seconds;
% Get measurement values
value = C{1, 7}(:,1);
% Plot
plot(seconds-(seconds(1,1)), value, '.');
xlabel('Tid [s]')
ylabel('Spänning [V]')
hold on;

% Approximate sample count
samples_per_second = size(t,1)/( (seconds(end,1)-(seconds(1,1)) - (seconds(1,:)-seconds(1,1)) ))

% C value
dist = abs(value - 3.19); % https://se.mathworks.com/matlabcentral/answers/375710-find-nearest
minDist = min(dist);
index1 = find(dist == minDist);

dist = abs(value - 4.19);
minDist = min(dist);
index2 = find(dist == minDist);

T1 = seconds(index1(1),1);
T2 = seconds(index2(1),1);
Cvalue = T2-T1;

format short
Cvalue_rounded = round(Cvalue,3)
format long

% ESR1
Index_V1 = find(value > 0.005, 1,'first');
value(Index_V1,1)
value((Index_V1-1),1);
ESR1 = value(Index_V1,1)-value((Index_V1-1),1);
```