



LUNDS UNIVERSITET

# Säkerhetsförstärkning genom integrerad PoE-batteribackup till övervakningssystem

Michael Redebjörk, Ludvig Svartåker

Institutionen för elektro- och informationsteknik, LTH,  
Lund University SE-221 00 Lund, Sverige

Juni 2022

## Sammanfattning

Med elektrisk utrustning finns alltid risken att strömförsörjningen fallerar och på så vis sätter utrustningen ur spel. I fallet med övervakningskameror leder detta till att bildströmmen från kameran bryts och det som är satt under bevakning lämnas obevakat. Detta kan potentiellt få allvarliga konsekvenser om det är viktigt att övervakningen är oavbruten. En lösning är att förse utrustningen med någon form av avbrottsfri strömförsörjning. Den vanligaste energikällan i ett sådant system för elektronikprodukter är batterier.

Detta examensarbete syftar till att undersöka möjligheten att förse en Power over Ethernet-driven kamera med en batteribackup inom ramen för dess Power over Ethernet-klassning. Målet var att ta fram en krets som kunde driva kameran med batteribackupen i en timme utan störningar i systemfunktion vid övergång från primär matning till batteridrift, och att batteriet skulle laddas då kamerans primära strömmatning var ansluten. Under framtagningsprocessen undersöktes och utvärderades de hårdvarumässiga förutsättningarna, olika batterityper och batteriladdningsmetoder för att kunna utveckla en prototypkrets.

Resultatet var två snarlika kretsar som baserades på två olika tillämpningar av vald batterihanteringskrets. Den ena tillämpningen visade sig mindre duglig under förutsättningarna, men den andra tillämpningen kunde med vissa tillägg driva kameran utan bortfall av bildström eller annan störning i funktioner, och utan att överskrida maximala tillåtna effektförbrukning enligt dess PoE-klassning.

Nyckelord: PoE, UPS, Batteribackup, BMS, SMPS, Lithiumbatterier

## **Abstract**

With all electrical equipment there is always a risk of failure due to power supply fault. If the equipment is a surveillance camera, the result is an interruption in the camera feed that will leave whatever object the camera is set to monitor under no surveillance, and thus defeating the purpose of surveillance. This can potentially have serious consequences if the object has to be monitored continuously. A solution to this problem is to fit the equipment with an uninterruptible power supply. The most common power source in smaller electrical equipment is one or several batteries.

The aim of this thesis was to examine the possibility of equipping a PoE powered surveillance camera with a battery-based backup power supply within the framework of the cameras PoE class. The goal was to develop a prototype circuit that could power the camera for one hour without interruption in the camera functionality during transition from the primary PoE power supply to battery operation. The prototype should also be able to charge the battery during normal PoE powered operation. Different battery chemistries as well as different methods of battery charging were examined and evaluated together with the given camera hardware. The results thereof formed the basis of the development of a prototype circuit board.

The result was two similar circuits based on two typical applications of the chosen battery charger IC. One of them was shown to be less suitable for the specific camera hardware that was the basis of this thesis, but the other application was able to power the camera without any loss of function in the camera for at least one hour.

Keywords: PoE, UPS, Battery backup, BMS, SMPS, Lithium batteries

## **Förord**

Vi vill tacka våra handledare Marko Stozinic och Johan Sjöbäck på Axis Communications för all hjälp de gett oss, för att vi kunde fråga i princip när som helst och de tog sig tiden att hjälpa till oavsett om de satt med annat arbete.

Vi vill även tacka vår handledare på LTH, Andreas Johansson för hjälpen han gett oss och möjligheten att brainstorma idéer med honom.

Till sist vill vi även tacka all annan personal på Axis Communications som tog sig tid att hjälpa oss dels på kontoret, dels de som hjälpte att validera PCB-designen vi hade samt chassit som de 3D-printade åt oss.

# Innehållsförteckning

<b>Sammanfattning</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>ii</b>
<b>Förord</b>	<b>iii</b>
<b>1 Inledning</b>	<b>3</b>
1.1 Bakgrund och syfte . . . . .	3
1.2 Målformulering . . . . .	4
1.3 Problemformulering . . . . .	4
1.4 Avgränsning . . . . .	4
<b>2 Teknisk bakgrund</b>	<b>5</b>
2.1 Power over Ethernet . . . . .	5
2.2 Power ORing/Power Path management . . . . .	6
2.3 Batterier . . . . .	7
2.3.1 Pb-syra . . . . .	7
2.3.2 Ni-Cd . . . . .	8
2.3.3 Ni-MH . . . . .	9
2.3.4 Li-ion . . . . .	10
2.4 Regulatorer . . . . .	12
2.4.1 Battery Management System . . . . .	12
2.4.2 Boostregulator . . . . .	14
<b>3 Metod</b>	<b>16</b>
3.1 Kommunikation med företaget . . . . .	16
3.2 Förstudie . . . . .	16
3.2.1 Hårdvara . . . . .	16
3.2.2 Effektförbrukning . . . . .	17
3.3 Kretsdesign . . . . .	18
3.3.1 Val av battericell . . . . .	19
3.3.2 Val av BMS . . . . .	20
3.3.3 Val av boostregulator . . . . .	22
3.3.4 Styrkrets I . . . . .	24
3.3.5 Styrkrets II . . . . .	26
3.4 Kretsevaluering . . . . .	28

3.5	Källkritik . . . . .	29
<b>4</b>	<b>Resultat</b>	<b>30</b>
4.1	Boostregulatorn . . . . .	30
4.2	Styrkretsar . . . . .	32
4.3	Kamerans ORing-krets vid omslag . . . . .	34
4.4	Slutgiltig krets . . . . .	37
<b>5</b>	<b>Slutsats</b>	<b>40</b>
5.1	Diskussion . . . . .	40
5.2	Framtida utvecklingsmöjligheter . . . . .	42
5.3	Reflektion över etiska aspekter . . . . .	43
<b>6</b>	<b>Appendix</b>	<b>46</b>
6.1	Termer . . . . .	46
	<b>Källförteckning</b>	<b>47</b>

# 1 Inledning

I detta avsnitt redogörs för bakgrunden till examensarbetet samt dess förutsättningar och mål.

## 1.1 Bakgrund och syfte

Axis Communications är ett teknikföretag med säte i Lund vars primära inriktning är utveckling och tillverkning av nätverkskameror. En nätverkskamera är en kamera som sänder bildströmmen över ett IP-nätverk och inte direkt till en eller flera specifika bildskärmar eller andra mottagare. Axis Communications var det första företaget i världen att lansera nätverkskameror [1]. Många av Axis kameraprodukter använder sig av Power over Ethernet (PoE), som är ett sätt att överföra både data och ström över samma kabel och på så sätt spara på kablagen och minska antalet externa komponenter som behövs för att driva utrustningen. PoE-utrustning klassificeras efter maximal effektförbrukning, där klasserna anger gränsen för hur mycket ström utrustningen tillåts dra från PoE-matningen.

Med elektrisk utrustning finns alltid risken att strömförsörjningen fallerar och sätter utrustning ur spel. I fallet med Axis nätverkskameror leder detta till att bildströmmen från kameran bryts och det som är satt under bevakning lämnas obevakat. Detta kan potentiellt få förödande konsekvenser om det är av stor vikt att övervakningen är oavbruten. En lösning är att förses utrustningen med någon form av avbrottsfri strömförsörjning (UPS, uninterruptible power supply) som kan mata utrustningen i händelse av störning eller avbrott i den primära matningen. Den vanligaste energikällan i ett sådant system för elektronikprodukter är batterier. UPS brukar vanligtvis beteckna fristående anordningar, och av den anledningen kommer benämningen batteribackup istället att användas för att beteckna det som utgör fokus för detta examensarbete.

Detta examensarbete syftar till att på Axis Communications uppdrag undersöka möjligheten att förses företags kameror med ström vid fallerande primär matning eller vid spänningsdipp med en batteribackup. Vidare ska möjligheten att ladda batterierna vid normal drift undersökas, utan att kamerans maximala tillåtna effektuttag enligt dess PoE-klass överskrids.

Resultatet av undersökningarna ska utröna vilken metod för batteriladdning och vilka batterier som är bäst för att kunna säkerställa en pålitlig drift i händelse av strömavbrott eller andra störningar på matningen. Vidare ska det även analyseras i vilka situationer som en batteribackup som förses med energi med PoE-teknik, är tillräcklig för att uppnå en effektiv lösning till problem som kan uppstå

vid matningsbortfall.

## **1.2 Målformulering**

Målet för detta examensarbete är att ta fram en batteribackup-krets till en PoE-driven nätverkskamera, som vid behov kan ladda ett batteri med effektmarginalen som kamerans PoE-klassning medger, och som vid matningsbortfall kan slå om till batteridrift tillräckligt snabbt för att kamerans funktion inte ska påverkas. Batteribackupen skall kunna driva kameran under en timme, vilket uppdragsgivaren har bedömt vara en rimlig tidsfrist för att kunna återställa den primära PoE-matningen i händelse av PoE-matningsbortfall.

## **1.3 Problemformulering**

Detta examensarbete kommer att utvärdera och besvara följande frågeställningar:

- Hur kan en batteribackup för PoE-baserade kameror konstrueras så att det är anpassat till kamerans PoE-klassning och hur kan en sådan lösning se ut?
- Vilka kriterier, med avseende på störningar och dippar i den primära strömförsörjningen, skall uppfyllas för att backupen tar vid?
- Vilka batterityper är mest lämpliga i denna specifika tillämpning, och vilka batteriegenskaper är viktiga?
- Kan man designa och konstruera ett backupsystem som även har relevant EMC-klassning inom utsatt tidsram?

## **1.4 Avgränsning**

PoE-tekniken kommer inte att modifieras utan befintliga klassningar används. Hela batteribackupen kommer inte byggas från grunden, utan vissa redan existerande delkretsar kommer användas. Befintliga modeller av olika battericeller kommer användas.

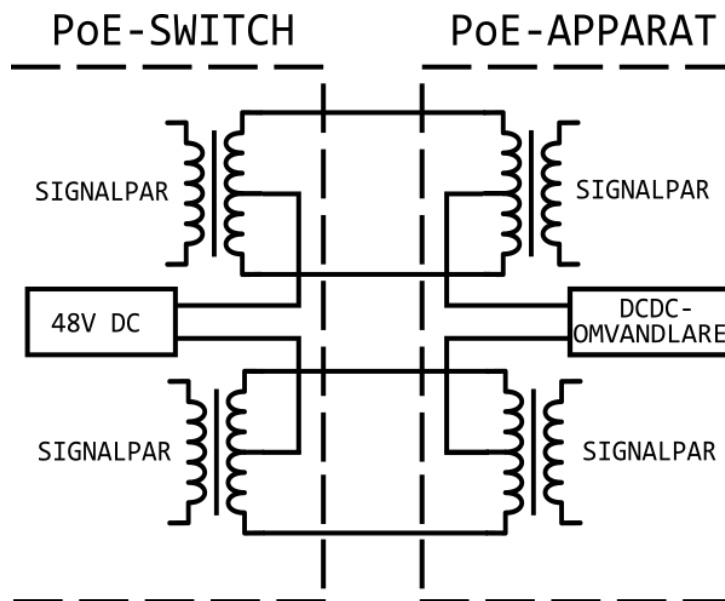


## 2 Teknisk bakgrund

I detta avsnitt presenteras den teknik som utgör bakgrunden till de undersökningar som genomfördes i detta examensarbete. Även den teknik som används i examensarbets lösningsförslag och resultat redogörs för i detta avsnitt.

### 2.1 Power over Ethernet

Power over Ethernet (PoE) är en teknik som möjliggör överföring av både data och matningseffekt över samma kabel. Den uppenbara fördelen med detta är att behovet av extern strömförsörjning till utrustning som använder Ethernet för dataöverföring försvinner. Utöver diverse icke-standardimplementeringar beskrivs PoE-tekniken av IEEE-standarderna 802.3af, 802.3at och 802.3bt.



Figur 1: Fantommatning för överföring av ström i PoE-tillämpning. Likspänningen matas via mittuttaget på pulstransformatorn i PoE-Switchen, och tas ut från mittuttaget i PoE-apparaten. Ledningarna som förbinder transformatorerna är ledarna i kabeln mellan switch och apparat. Endast två signalpar är avbildade.

I Ethernet-baserad dataöverföring används en kabel med åtta ledare som utgör fyra signalpar, där en datasignal sänds differentiellt över ett signalpar. I tidiga

tillämpningar överfördes matningseffekten via de två oanvända signalparen så som specificeras i äldre 10BASE-T-Ethernet, men då modernare Ethernettillämpningar använder alla fyra signalparen för dataöverföring är det numera vanligast att matningseffekten överförs via två signalpar i ett arrangemang som kallas fantommatning [2, s. 65], som illustreras i figur 1. Principen för fantommatning i PoE-sammanhang bygger på att signalöverföringen sker differentiellt, vilket gör att den common modespänning som PoE-spänningen utgör inte påverkar datasignalen. Spänningen tas ut vid mittutaget på den pulstransformator som Ethernet-standarder kräver för signalisolering. Då mittutaget på transformatorn idealt är utformat på så sätt att impedansen åt båda riktningarna är lika bidrar inte fantommatningsströmmen till någon magnetisering av kärnan. För att mata PoE-utrustning med ström används en PoE-switch, som är en Ethernet-switch med inbyggt nätaggregat för strömförsörjning, vanligtvis med 48V utspänning.

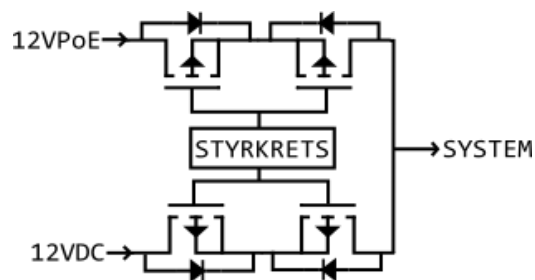
PoE erbjuder spänning mellan 37 V och 57 V. IEEE-standarderna specificerar åtta klasser för effektöverföring enligt tabell 1.

Klass 1	Klass 2	Klass 3	Klass 4	Klass 5	Klass 6	Klass 7	Klass 8
3,84W	6,49W	13W	25,5W	40W	51W	62W	71,3W

Tabell 1: PoE-klasser[3]

## 2.2 Power ORing/Power Path management

För att öka ett elektriskt systems driftsäkerhet kan det försees med en eller flera reservmatningar som tar över om den primära strömförsörjningen fallerar. Denna typ av kretslösning med flera matningar saknar svensk beteckning men kallas Power ORing-krets på engelska[4].



Figur 2: Power ORing-krets som används då flera matningar är kopplade till ett system.

Transistorernas common-sourcekonfiguration i ORing-kretsen fungerar i princip som en diod med mer ideala egenskaper i det att de blockerar i backriktning men leder i framriktning med lägre framspänningsfall än en diod. Styrkretsen bevakar matningsbortfall och styr in och -urkoppling beroende på vilken matning som har prioritet. Vissa kretstillverkare använder beteckningen Power Path management för denna typ av funktioner, i synnerhet då det rör sig om funktioner i batterihanteringssystem för byte mellan laddning och urladdning av batterier. Figur 2 illustrerar ett sådant system med två matningar, implementerat med pMOS-transistorer.

## 2.3 Batterier

Detta avsnitt behandlar information kring fysisk uppbyggnad, elektriska egenskaper samt användningsområden för olika batteritekniker. För att med en faktabaserad metod kunna avgöra vilken typ av battericell som skulle kunna lämpa sig för detta examensarbete har litteratur studerats och granskats, där en större volym av information har inhämtats från boken Gianfranco Pistoia. Batteries for portable devices. Elsevier Science, 2005 [5].

Tekniska termer avseende battericellers egenskaper definieras i appendix 6.1.

### 2.3.1 Pb-syra

Bly-syra (Pb-syra) batterier finns tillgängliga i två olika utföranden. Dessa är Sealed Lead Acid (SLA) och Valve Regulated Lead Acid (VRLA), där det innebär att SLA är totalt förseglad medan VRLA har en extra ventil som kan frigöra internt övertryck. SLA refereras ofta till som en portabel battericell med lägre kapacitet medan VRLA refereras till som ett stationärt batteri med högre specifik energi [5, s.78]. Däremot lämpar sig inte Pb-syra batterier i de flesta applikationer på grund av deras låga energidensitet och på grund av batteriets storlek.

Pb-syra batterier är känsliga för överladdning då laddningsströmmen är hög. Vilket kan resultera i att denna typ av battericell behöver extra övervakning eftersom överladdning vid höga strömmar måste undvikas. Detta eftersom det annars kan frigöras väte- och syrgas genom säkerhetsventilen [5, s.80].

Generellt är spänningen över ett Pb-syra batteri 2 V/cell. Däremot är en fördel med VRLA Pb-syra batterier att de går att få i 6 V, vilket underlättar DCDC-konvertering. Detta på grund av att det finns fler DCDC-kretsar från 6 V spänningsnivå. Den bibehållna kapaciteten är jämn vid både rumstemperatur och lägre temperaturer vilket gör att denna egenskap för Pb-syra är bättre än andra

batterityper som till exempel Ni-Cd eller Ni-MH. Underhållsladdning för Pb-syra batterier är av yttersta grad viktigt då batterierna inte används eller är inaktiva under en längre period. Detta eftersom en legering av sulfider kan bildas på elektroden då batteriet är urladdat [5, s.82].

### 2.3.2 Ni-Cd

Nickel kadmium (Ni-Cd) batterier är en batterityp som fortfarande är populär ur ett globalt perspektiv. Ni-MH och Li-ion batterier har dock tagit över som de dominerande batterityperna [5, s.84].

Fördelar med Ni-Cd batterier är bland annat styrkan då de utsätts för överladdning. De kan då klara upp emot 30% vid positiv överladdning, medan de vid urladdning kan nå ner till 15–20% av kapaciteten. Upprepade urladdningar resulterar i ett överskott av vätgas, vilka sakta förbrukas i materialet och kan, då trycket blir för högt, extraheras via en säkerhetsventil som är placerad vid den positiva elektroden.[5, s.85]

Ytterligare fördelar med Ni-Cd batterier är deras temperaturprofil. Vid en standardtid på 5 timmar kan en stor del av batteriets kapacitet laddas upp vid temperaturer under 0°C. Anledningen till att detta är möjligt är på grund av att den interna resistansen håller sig låg även under 0°C. De flesta Ni-Cd batterier kan förvaras i temperaturer från -40°C upp till 60°C utan någon signifikant påverkan på prestandan [5, s.89].

Nackdelar med Ni-Cd batterier är att då temperaturen överstiger 40°C krävs en högre strömmatning, vilken ofta behöver vara 140% högre än basvärdet [5, s.91]. Liksom med laddning vid högre temperaturer uppstår det också problem då batteriet laddas i temperaturer under 0°C, vilket kan medföra att livslängden på batteriet minskar om förfarandet upprepas. Energidensiteten är lägre för Ni-Cd batterier jämfört med andra mer populära alternativ som Ni-MH och Li-ion batterier [5, s.79].

Ytterligare nackdelar är att Ni-Cd batterier klarar oftast runt 700 cykler av full urladdning vid 1C kontra 4000 cykler då urladdning sker till 25% av cellens kapacitet [5, s.93]. Ni-Cd batterier utgör ett miljöproblem eftersom de innehåller den giftiga metallen kadmium, vilket är en annan anledning till att denna typ används allt mindre och i stället Ni-MH samt Li-ion blir allt mer populära. [5, s.226]

### 2.3.3 Ni-MH

Där är många likheter mellan Ni-Cd och Nickel-Metal Hydride (Ni-MH) batterier. Däremot har Ni-MH högre energidensitet samt längre brukbar livstid. Utöver detta är även Ni-MH batterier miljövänligare än Ni-Cd eftersom ingen kadmium används. Överlägsen urladdningskapacitet är ännu en fördel jämfört med Ni-Cd och den tidigare nämnda energidensiteten gör Ni-MH batterier till ett bättre val i relation till Ni-Cd [5, s.96]. De båda typerna delar även många likheter kring design vilket gör det enkelt att byta från Ni-Cd till Ni-MH batterier.

Cellerna i ett Ni-MH förlorar lite kapacitet vid hög urladdning, men däremot är Ni-MH batterier kapabla till att upprätthålla en hög urladdningsström. Nackdelen med detta blir att upprepade urladdningar med hög ström resulterar i minskad brukbar livstid. Urladdningsprofilen för Ni-MH är däremot stabilare än Ni-Cd och har en urladdningskapacitet på 100% vid 20 grader [5, s.103]. Full kapacitet uppnås även efter laddning. Bästa resultat för laddning uppnås vid 0.2C eller 0.5C [5, s.101]. För att uppnå en tillförlitlig laddning av Ni-MH batterier krävs en noggrann övervakning så att temperaturen inte stiger för högt. Anledningen till detta är att den kemiska reaktion som uppstår då Ni-MH laddas är exotermisk, vilket innebär att värme skapas och därför ökar temperaturen avsevärt mycket snabbare än för Ni-Cd batterier vars kemiska reaktion är endotermisk [5, s.104]. Oftast laddas Ni-MH med en konstant ström, och för att lyckas hålla en stabil laddningsnivå krävs det att temperaturen håller sig inom 10–30°. Understiger temperaturen 10°C finns det risk för att batteriet överladdas och därmed kan ta skada. Detta innebär att någon form av laddningsövervakning är ett krav för att undvika skador [5, s.105].

Generellt för Ni-MH batterier, då laddning sker med 0.2C vid 20°C och under begränsad överladdning, kan batteriet hålla över 500 cykler innan kapaciteten sjunker ner till 80% av det initiala värdet. Som tidigare nämnt är temperaturen ytterst viktig vid laddning och om batteriet laddas över 20°C upprepade gånger kan den brukbara livstiden för batteriet minska kraftigt [5, s.108].

Ni-MH-batterier har en specifik energi på över 100 Wh/kg och energidensitet på 300 Wh/L, vilket gör att Ni-MH är överlägsen Ni-Cd. Andra fördelar med Ni-MH är dess marginella minneseffekt samt en mindre miljöpåverkan kontra Ni-Cd.[5, s.109]

### 2.3.4 Li-ion

Uppkomsten av Litium Ion (Li-ion) batterier på marknaden har helt ändrat möjligheterna för att driva portabla enheter med batteridrift. Några av fördelarna är en hög specifik energi och energidensitet, låg självurladdning, lång cykellivslängd, inget underhåll krävs, ingen minneseffekt och bred profil för olika temperaturer. [5, s.119]

Några nackdelar är krav på en säkerhetskrets som kontrollerar överladdning, för hög urladdning samt temperaturökning. Utöver detta förlorar även Li-ion effektivitet vid höga temperaturer och Li-ion har lägre effekt än Ni-Cd samt Ni-MH, speciellt vid låga temperaturer [5, s.120]. Dessa nackdelar kan möjligtvis bortses ifrån då det ständigt görs förbättringar som bland annat ökar effekten och även att simplare säkerhetskretsar krävs.

Li-ion-batteriers fysiska förmåga att överföra energi består av två kategorier, flytande och fast elektrolyt. Elektrolyt är ett material vars förmåga möjliggör överföring av joner mellan anoden och katoden. Valet av elektrolyt har betydelse för bland annat hur väl batteriet presterar i olika temperaturer, men även hur väl materialet motverkar självurladdning [5, s.128].

Den vanligaste flytande elektrolyten för Li-ion är en saltblandning vilken ger en hög konduktivitet. Nackdelen med denna saltblandning är att effektiviteten minskar avsevärt vid temperaturer under  $-20^{\circ}\text{C}$  och temperaturer över  $60^{\circ}\text{C}$ . Ytterligare en nackdel med flytande elektrolyt är att brand kan uppstå då det finns en ventil som frigör övertryck, vilken är brandfarlig [5, s.128]. Det är alltså yttersta vikt att kontrollera temperaturen kontinuerligt då batteriet är i drift.

Elektrolyt i fast form, även kallad polymer-elektrolyt bidrar med några fördelar över flytande elektrolyt till exempel inga läckage, flexibilitet samt tunnare konstruktion. Andra fördelar är hög konduktivitet vid rumstemperatur och lägre temperaturer samt att man kan få en bra fästytta till elektroderna. Den vanligaste metoden är att använda en form av gelelektrolyt där man binder en flytande elektrolyt till ett material för att uppnå en gelstruktur [5, s.137].

Konstruktionsmöjligheterna för Li-ion batterier är oftast i cylindrisk- eller prismatisk form, där cylindrisk form kan vara att föredra i vissa applikationer då prismatisk form kan förlora viss kapacitet då strömmen når nivåer över 1C, detta på grund av dess geometriska struktur [5, s.130].

För att ladda Li-ion batterier kan flera tekniker användas under förutsättning att någon form av elektronisk säkerhetskrets används. Dessa tekniker kan bland annat vara laddning med konstant ström [5, s.130] eller laddning med pulse width modulation (PWM)-kontrollerad ström vilken också oftast används då tiden för

laddning kan minskas avsevärt i jämförelse till konstant ström. Innebörden av PWM-styrning ger också en konstant ström, däremot är strömmen justerbar och förlusterna blir lägre.

Cykelkaraktistiken för Li-ion batterier är väldigt god där cellerna kan klara av flera hundra djupa urladdningar med höga effekter i relativt stort temperaturspann utan att förlora mycket av sin kapacitet. Experiment har visat att en cell som gått igenom 1000 cykler med 100% urladdning kan ha kvar 70% av dess kapacitet, men ifall djupurladdning aldrig når under 70% kunde ingen förlust i kapacitet påvisas under 1000 cykler [5, s.135].

En teknisk sammanfattning av avsnittet och över karaktistiken för de olika batterityperna återges i tabell 2.

Karakteristik	Ni-Cd	Ni-MH	Pb-syra	Li-ion
Specifik energi [Wh/kg]	40-60	60-90	30-50	150-190
Energidensitet [Wh/L]	150-190	300-340	80-90	350-470
Cykellängd	1000-1500	500-1000	200-300	500-1000
Överladdningstolerans	medium	låg	hög	mycket låg
Självladdning/månad (rumstemperatur)	20%	30%	5%	<5%
Nominell spänning/cell [V]	1,25	1,25	2	3,7
Lastström [A]				
-topp	20C	5C	10C	>2C
-kontinuerlig	1C	0,5C	1C	1C eller lägre
Temperaturområde [°C]	-40 till 60	-20 till 60	-20 till 60	-20 till 60
Kommersiellt bruk	1950	1990	1970	1991

Tabell 2: Karakteristik för några typer av sekundära batterier [5, s.79]. Några viktiga parametrar i detta sammanhanget är specifik energi, energidensitet och självladdning.

## 2.4 Regulatorer

### 2.4.1 Battery Management System

System för batterihantering, även kallat battery management system (BMS), är den primära integrerade kretsen (IC) vars uppgift är att kontrollera ström- och spänningsnivån ut till battericellerna. Utöver har ICn även skyddssystem för över- och underladdning, temperaturnivåer med en Negative Temperature Coefficient (NTC) termistor samt cyklisk strömbegränsning. Skyddssystemen är viktiga då valet av battericell är Li-ion batterier vilka är känsliga för överladdning samt en temperaturprofil som innebär, på grund av materialet cellerna är konstruerade av, en brandrisk.

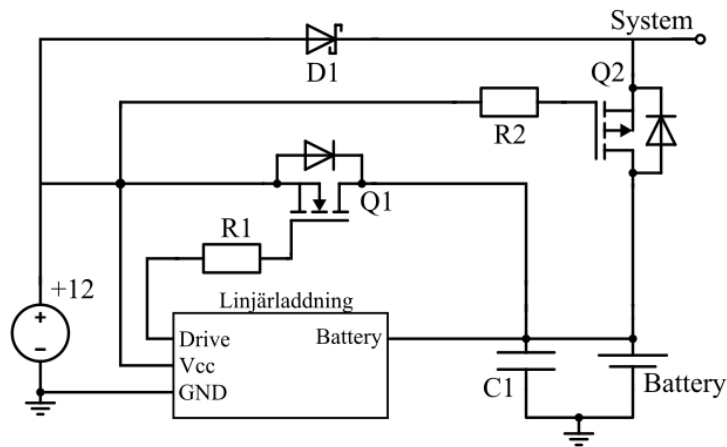
Två populära metoder för att ladda Li-ion batterier är linjärladdning samt switch-modeladdning där bägge har olika för- och nackdelar, varför valet av metod snarare handlar om förutsättningar än att en metod är bättre än den andra.

Linjärladdningens funktion är sådan att systemspänningen sänks med differensen av batterispänningen genom en transistor som arbetar i det linjära området, därav namnet [5, s.167]. Linjärladdning är en enkel laddningsmetod, är små jämfört med switch-mode kretsar eftersom färre komponenter krävs och genererar låga nivåer elektromagnetisk emission.

Däremot är effektiviteten lägre jämfört med switch-modeladdning därför att effektförlusterna är högre vid stor laddningsström. Detta eftersom effekten som förloras i transistorn beräknas med differensen mellan spänningskällan samt batterispänning multiplicerat med strömmen.

Figur 3 visar ett exempel på hur en krets med linjärladdning kan se ut, och då alla lösningar i examensarbetet har involverat Power Path är även en lösning för detta integrerat i kretsen. Transistorn Q1, här en nMOS-transistor men kan även vara en BJT-transistor, sänker spänningen från energikällan till önskad spänning över batteriet och är orsaken till större delen av effektförlusten. Drive-anslutningen på ICn ser till att rätt spänning finns över gate:n på Q1. Battery anslutningen läser av vilken spänning batteriet har för att, då rätt nivå uppnåtts, kunna stänga av Drive så att Q1 slutar leda. Q2 och D1 är Power Path funktionen, där Q2 är en pMOS-transistor vilket innebär att då spänning finns över gate:n är Q2 stängd så att ingen ström från batteriet når systemet. D1 är en diod, ofta en schottky, som möjliggör för energikällan att förse systemet med energi samtidigt som dioden blockerar omvänd strömriktning. Detta är viktigt för då energikällan fallerar och Q2 börjar leda får inte strömmen från batteriet mata bakåt till energikällan samt ICn.





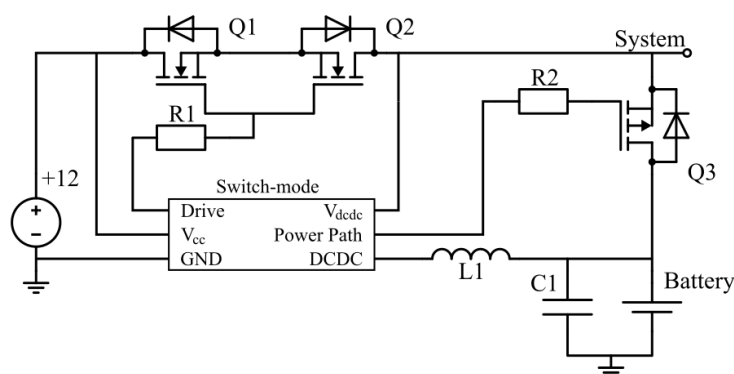
Figur 3: Simplifierad krets över en IC med linjärladdning som har extern Power Path. D1 och Q2 utgör Power Path-funktionen.

Laddningsströmmen går att justera beroende på vilken typ av linjärladdningskrets som används, där lägre laddningsström medför längre tid för full laddning. Därav begränsas denna metod till portabla applikationer som har lägre energibehov (då en större laddningsström är acceptabel och därför en högre förlust), när tiden för laddning inte har någon betydelse eller då utrymme i kretsen har större betydelse än effektförlusten eftersom färre komponenter krävs. Utöver detta kan linjärladdning endast minska spänningen från en adapter jämfört med switch-mode som både kan minska, öka samt invertera spänningen [5, s.168].

Vid switch-modeladdning används en DCDC-konverterare vilken generellt har en högre effektivitet (oftast över 80%) än linjärladdning och lägre effektförluster, även vid en högre strömbelastning. Nackdelen är att switchingfrekvensen introducerar komplikationer i form av elektromagnetisk störning (EMI) [5, s.168]. Detta medför att oönskad spänning eller ström kan uppstå, vilket kan innebära extra kringkomponenter eller en ändring av PCB:n för att nämna några åtgärder för att stävja störningar. Dessa åtgärder är viktiga att tänka på då funktionaliteten på kretsen kan påverkas.

Figur 4 visar ett exempel på hur en krets med switch-modeladdning kan se ut, denna gången med en internt styrd Power Path funktion. Q1 och Q2 är två stycken nMOS, där Q1 möjliggör en anslutning från energikällan till system och Q2 blockerar omvänd strömriktning, förlusterna blir små tack vare låg inre resistans i transistorerna. Detta används ofta i switch-mode sammanhang eftersom man på ett säkert sätt kan styra ett system utan risken för att ström går tillbaka in

i strömkällan eller ICn från batteriet. Power Path anslutningen på ICn är en signal som sänker spänningen över gate till Q3 när avbrott uppstår vid energikällan, vilket får Q3 att börja leda när en kritisk spänning uppnås vid ingången. Q3 är en pMOS som blockerar en ström från batteriet att nå systemet då kretsen är försedd med spänning. Drive-utgången från ICn ser till att rätt spänning ligger över gate till Q1 och Q2. Vcc strömförsörjer ICn medan Vdcdc är strömförsörjningen till DCDC-konverteraren. DCDC anslutningen från ICn är utgången från en intern DCDC-konverterare som sänker spänningen till batteriets önskvärda nivå.

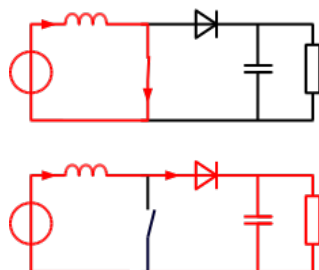


Figur 4: Simplifierad krets över en IC med switch-modeladdning som har integrerad Power Path. Q1, Q2 och Q3 utgör Power Path-funktionen.

Switch-modeladdning används ofta i applikationer där snabbare laddning har högre prioritet, mindre effektförluster och har oftast möjlighet att hantera fler battericeller än vad linjärladdning klarar av.

#### 2.4.2 Boostregulator

En boost-regulator eller -konverterare (även kallad step-up regulator) omvandlar en likspänning på ingångssidan till en högre likspänning på utgångssidan. Principiellt utgörs kretsen av en spole, en kondensator, en diod och en switch-transistor med pulsbreddsmodulerad switchning.



Figur 5: Boost-regulator med strömbanan i respektive halvcykel rödmarkerad [6].

I ena halvcykeln leder transistorswitchen. Spänningen över spolen är då lika med inspänningen och strömmen genom den ökar. Under andra halvcykeln spärrar transistorswitchen. Spolens polaritet är då positiv på grund av strömförändringen, och på så sätt adderas denna till inspänningen. Spänningen över kondensatorn, och således även utspänningen, måste då vara större än inspänningen. Figur 5 illustrerar boost-regulatorn. Det rödmarkerade i figuren visar strömgången under respektive halvcykel. Utspänningens storlek avgörs av switchningens pulskvot. Överföringsfunktionen ges idealt av

$$\frac{U_{ut}}{U_{in}} = \frac{1}{1 - D} \quad (1)$$

där  $D$  betecknar pulskvot.

## 3 Metod

Här redovisas de olika metoder och verktyg som användes för att realisera prototypen. För att möjliggöra detta delades arbetstiden under projektet upp i faserna förstudie, kretsdesign och kretsevaluering. Metodiken kring dessa faser redovisas i detta avsnitt.

### 3.1 Kommunikation med företaget

Majoriteten av tiden som lagts på examensarbetet har varit på företaget. Initialt startade arbetet med möten tillsammans med två handledare som författarna blev tilldelade på företaget, där beskrivning och önskemål togs upp. Kommunikationen därefter har omfattat möten och spontana samtal i företagets lokaler. Mötena hölls då större framsteg uppnåtts och totalt blev det fem möten.

### 3.2 Förstudie

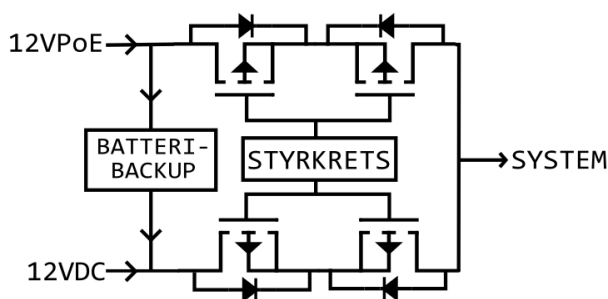
För att kunna ta ställning till hur en möjlig prototypkrets skulle kunna utformas var det nödvändigt att först studera de hårdvarumässiga förutsättningarna. I detta avsnitt redogörs för dessa förutsättningar.

#### 3.2.1 Hårdvara

Kameran som batteribackup skulle utformas för och testas på var en PoE-klass 4 enkanalskamera. Kameratypen finns också med upp till fyra kanaler, vilket innebär att det går att få fyra olika bildströmmar samtidigt. Den nominella PoE-spänningen på 48 V omvandlas i kameran till 12V likspänning. Utöver PoE-kraftmatning finns även möjligheten att mata kameran med en likspänning mellan 9V och 58V via en separat ingång som sedan omvandlas till 12V. Dessa två 12V-spänningar är sedan kopplade till en ORing-krets där PoE har prioritet. ORing-kretsens utgång utgör sedan matningsspänning till kamerans övriga kretsdelar. ORing-kretsen byter matning då spänningen från PoE-regulatorn sjunker till 11,1V. Det bedömdes att denna ORing-krets var den mest lämpliga punkt för inkoppling av en batteribackup då resten av kameran matas från denna krets.

Typiska batteribackuplösningar som förekommer i exempelvis bärbara datorer och andra portabla apparater tenderar att ligga i serie med systemets primära matningsspänning (se exempel [5, s.228]); en för ändamålet avsedd IC-krets över-

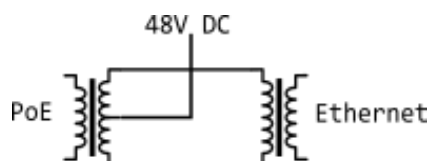
vakar in- och urkoppling av primär strömförsörjning, laddar batteriet vid behov då apparaten är ansluten till elnätet, och slår om till strömförsörjning med batteri då den primära strömförsörjningen försvinner. Figur 4 illustrerar det principiella utförandet. En sådan inkoppling skulle kunna åstadkommas genom att ta bort vissa delar i kamerans ORing-krets. Problemet härvid var dock att det inte gick att utesluta att ett sådant ingrepp skulle störa ORing-kretsens funktion, eller att andra kretskomponenter skulle kunna fördärvas vid borttagandet. Ett annat angreppssätt var att ta laddningsström till batteribackupen från PoE-matningens ingång till ORing-kretsen, och koppla backupens utgång till ingången för den externa matningens ingång till ORing-kretsen så som visas i figur 6. Vid dessa punkter fanns testpunkter där det skulle vara möjligt att löda fast ledare med mindre risk att störa ORing-kretsens funktion. Med en sådan inkoppling fås dock inte den typiska inkopplingen som diskuterats.



Figur 6: Punkter för inkoppling av backup-krets på kameran.

### 3.2.2 Effektförbrukning

Kamerans effektförbrukning under olika laster mättes för att ge en uppfattning om vilken effekt som skulle vara möjligt att avsätta till laddning av backup-kretsens batterier utan att överstiga maximala effekten för PoE-klass 4. Effektförbrukningen mättes genom att mata kameran med 48V via en PoE-injektor kopplat till ett labbaggreat. En PoE-injektor gör det möjligt att ersätta PoE-switchens strömförsörjning till enheten med en extern matning. Figur 7 visar principen för inkoppling av injektorn. Kamerans effektförbrukning kunde då uppskattas genom att avläsa strömuttaget från labbaggreat vid vald spänning.



Figur 7: PoE-injektor för matning av PoE-apparat med ett labbaggregat, endast ett signalpar avbildat.

Tre testfall för effektförbrukning undersöktes: tomgång, typisk förbrukning och hög förbrukning. Vid tomgång var endast PoE inkopplat utan kamera, vid typisk förbrukning var endast kameran inkopplad och vid hög förbrukning var alla externa effektförbrukande funktioner så som SD-kortsinspelning och ljudupptagning inkopplade. Effektförbrukningen vid dessa fall redovisas i tabell 3.

Testfall	Effektförbrukning
Tomgång	4,8W
Typisk	6,2W
Hög	7,3W

Tabell 3: Testfall effektförbrukning

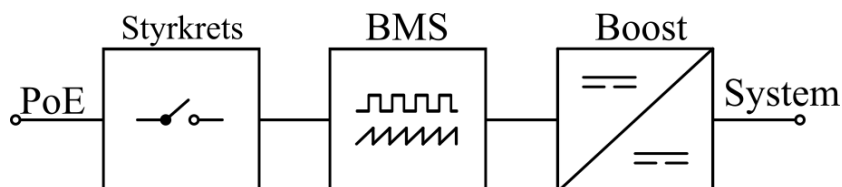
Då kameran har PoE-klass 4 ger detta väldigt goda effektmarginaler över till laddningskretsen; det skulle alltså vara möjligt att ta ut minst 1,5 A till laddningen. Anledningen till att kameran inte har lägre klassning beror på att den kan ha upp till fyra kamerakanaler aktiva samtidigt. Fyrkanalsvarianten har en maximal effektförbrukning på ca 16W, vilket motiverar PoE-klassningen.

Idealt hade det gått att styra gränsen för maximal tillåten laddningsström genom att backupkretsen kunde mäta kamerans effektförbrukning, men det fanns ingen lämplig punkt för inkoppling av strömshunt eller dylikt för strömavkänning. Detta innebar att backupkretsen skulle få utformas efter kamerans maximala effektförbrukning.

### 3.3 Kretsdesign

För en fullständig batteribackup till kamerasytemet identifierades slutligen tre nödvändiga kretskomponenter: En krets för laddning av batteri med nödvändiga

säkerhetsfunktioner, en krets som omvandlar batterispänningen till de 12 V som driver kameran och en styrkrets som på något sätt styr laddning och urladdning av batteriet och när detta ska ske, se figur 8. Detta utgjorde utgångspunkten för framtagandet av en prototypkrets.



Figur 8: Blockschema över de olika kretsdelarna.

### 3.3.1 Val av battericell

Blybatterier har flera nackdelar och är även en teknik som sällan används i dagens mindre portabla enheter. Däremot används fortfarande blybatterier frekvent i andra applikationer som till exempel UPS-system vilket innebär att det är av intresse att undersöka. En sammanställning av de olika batteriteknikerna, vilka återges i avsnitt 2.3, kan uttryckas med bland annat energidensitet, specifik energi, effektivitet och miljöpåverkan. Dessa återfinnes i tabellerna 2 och 4.

Batteri	Ni-Cd	Ni-MH	Pb-syra	Li-ion
Energi	4	6	4	10
Effekt	10	8	6	7
Temperatur	10	8	8	8
Urladdning	8	8	6	7
Effektivitet	6	6	8	10
Livslängd	10	7	8	9
Kostnad	8	6	8	7
Miljöpåverkan	1	7	1	7

Tabell 4: Batteriegenskaper med graderingsskala 1-10, där 10 är bäst [5, s.81].

Då Li-ion batterier enligt tabellerna 2 och 4 har bättre energiegenskaper, livslängd, effektivitet och miljöpåverkan föll valet på Li-ion batterier som sekundär energikälla till prototypen.

Något som var viktigt för företaget var tiden som batteribackupen skulle kunna agera tillfällig spänningskälla, se målformulering 1.2, vilket lämpade Li-ion cellerna väl då dessa har en hög energidensitet jämfört med storlek.

Vidare krävdes det ytterligare studier kring vilka spännings- och strömnivåer som var lämpliga för att driva kamerasystemet. Då spänningen i en litiumcell är 3,7 V vid kontinuerlig drift beräknades effektbehov utifrån olika testfall med företagets system, se avsnitt 3.2.2. Vid hög belastning hade enkanalskameran en effektförbrukning på 7,3 W och fyrkanalskameran vid samma belastning hade en effektförbrukning på ca 16 W. För att möjliggöra en prototyp som var förberedd att kunna integreras i flera olika system togs beslutet att dimensionera battericellerna utefter en högre maximal uteffekt. Detta för att visa möjligheterna kring flexibilitet på de kretsar som valdes för projektet.

Två litiumceller [7] valdes med en nominell spänning på 3,6 V (4,2 V vid full laddning) samt 2600 mAh och dessa kopplades i serie för att uppnå en spänning på 7,2 V vid kontinuerlig drift och därmed underlätta valet av boostregulator. Utöver var beslutet att seriekoppla cellerna grundat i att hålla strömnivån nere, för att minska förluster i transistorerna. Maximala kontinuerliga urladdningsström hos en cell är 4,4 A som resulterar i en maximal effekt på 31,68 W från batterierna. Vilket ger marginaler att uppnå driftkraven oavsett kamerasystem.

Batterierna är av modellen 18650, vilka är en vanlig modell och är brett tillgängliga, varför också beslutet blev att använda dessa till projektet.

### **3.3.2 Val av BMS**

Systemet för batterihantering var en kritisk punkt i designen då den utformade kärnan i kretsen. Därav jämfördes flertal olika integrerade kretsar genom att läsa igenom respektive datablad för att hitta viktiga egenskaper som skulle kunna passa in till detta projekt. Egenskaper som undersöktes var tidsåtgång för laddning, effektförluster, maximal matningsspänning, flexibla val av viktiga parametrar såsom begränsning av laddningsström, spänningsnivåer och temperaturintervall samt en integrerad DCDC-konverterare (för switch-mode).

Ytterligare egenskaper var laddningsström och tiden för att nå full kapacitet. Två val lämpade sig väl för detta: linjär- och switch-modeladdning, vilka återfinnes i avsnitt 2.4.1. Då systemets spänningskälla är PoE så är effekten begränsad. Till prototypens tillämpning användes ett system med PoE-klass 4, varför kri-



teriet att minska effektförlust blev den betydande faktorn. Detta eftersom systemet har en egen maximal effektförbrukning på 7,3 W, vilket förutsätter att prototypen förbrukar mindre än 18,2 W. Utöver effektförluster tar det vid linjÄrladdning längre tid att ladda upp cellerna på grund av den lägre möjliga laddningsströmmen. När det kommer till flexibilitet med avseende på att kunna använda prototypen till olika system som har olika förutsättningar, lämpar sig switch-mode bättre då dessa IC kan hantera flera celler än linjÄrladdning. Se tabell 5 för en sammanfattning av alla egenskaper. Därmed togs beslutet att använda en BMS med switch-modeladdning då metoden för linjÄrladdning innebar högre effektförluster än switch-modeladdning. Den IC-krets som valdes var BQ24133.

Modell	BQ24133	BQ25171
Laddningsmetod	Switch-mode	linjär
Spänning in [V]	4,5-17	3-19
Spänning ut (max) [V]	13,5	10,5
Ström ut [A]	0,6-2,5	0,01-0,8
Temperaturområde (intern)	-40 till 120	-40 till 125
Effektivitet [%]	≤ 92	45,8 till 70 *
Noggrannhet, laddning:		
-Spänning	±0,5%	±0,5%
-Ström	±5%	±10%
Överspänningsskydd	Ja	Ja
Intern Power Path	Ja	Nej
Skyddssystem för batteri:		
-Under/överspänning	Ja	Ja
-Under/överström	Ja	Ja
-Temp. bevakning	Ja	Ja
Snabbladdning [h] (lägst)	1	5
Antal celler	1-3	1-2

Tabell 5: Jämförelse av två olika IC för batterihantering från Texas Instruments.  
\*Effektiviteten beräknas med värsta tänkbara batterispänning samt vid optimal batterispänning: 5,5/12 V samt 8,4/12 V.

### 3.3.3 Val av boostregulator

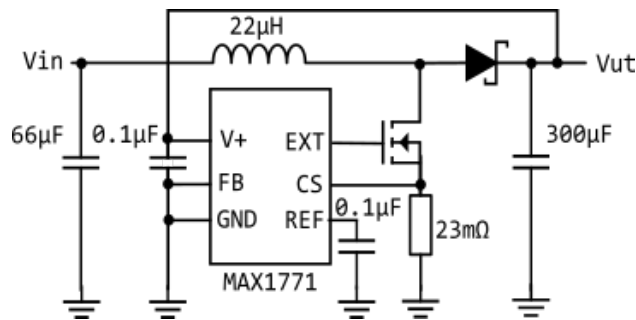
Den boostregulator-IC som valdes som utgångspunkt för utspänningsregulatorkretsen var MAX1771. Valet baserades huvudsakligen på dess enkelhet då den saknar många av de extrafunktioner som nyare regulatorer har. Det behövs dessutom ingen extern kontrolloopskompensering för dess reglering. Detta antogs min-

ska tidsåtgången och risken för eventuell felsökning. Den har dessutom en förinställd utspänning på 12V, som fås genom att jorda feedback-ingång samtidigt som IC:ns matningsspänning tas från dess utgång så som illustreras i figur 9. Den har en maximal uteffekt på 24 W, vilket förvisso är något lägre än PoE-klass 4 men eftersom kamerans maximala effektförbrukning var ca 16W bedömdes det vara tillräckligt. Till skillnad från de flesta andra boostregulatorer använder MAX1771 sig av pulsfrekvensmodulering (PFM) istället för pulsbreddsmodulering. PFM innebär att pulskvoten är fix men att moduleringen istället sker genom att variera pulsfrekvensen. Den i databladet angivna maximala switchfrekvensen är 300kHz, men torde vara betydligt lägre vid låg last då PFM-drivna regulatorers switchfrekvens är proportionell mot uteffekten [8].

Regulatorns användning av PFM gjorde det något svårt att på ett mer teoretiskt underbyggt sätt välja passiva kringkomponenter då dimensioneringsformler för dessa tenderar att basera sig på att switchfrekvensen är statisk och där pulskvot fås av ekvation 1, så som är fallet då regulatorn använder sig av pulsbreddsmodulering (se exempel [9, s.815]). Databladet saknar uppgifter om pulskvot, och då det inte fanns några simuleringsmöjligheter för IC:n baserades valet av passiva kringkomponenter på utformningen enligt figur 2a i databladet för MAX1771. figur 2a databladet som ger en regulator med en utspänning på 12V och en utström på 500mA. Eventuella justeringar i utgångskapacitans skulle kunna göras i efterhand genom att helt enkelt lägga till eller ta bort kondensatorer på utgången, och ett lägsta värde för spolens induktans ges i databladet av [10, s.10]

$$L > \frac{V_{inMAX} \cdot 2\mu s}{I_{utMAX}} \quad (2)$$

Om regulatorn dimensioneras efter fyrakanalskamerans maxeffekt på 16W ger detta en maximal utström på 1,34 A vid 12V. Med en maximal inspänning på 8,4V från två fullt laddade battericeller i serie måste alltså induktansen var större än 12,5  $\mu$ H. Figur 9 visar den slutliga utformningen som skulle användas för att driva kameran.



Figur 9: Förenklad illustration av vald boostregulator MAX1771 med passiva komponenter.

### 3.3.4 Styrkrets I

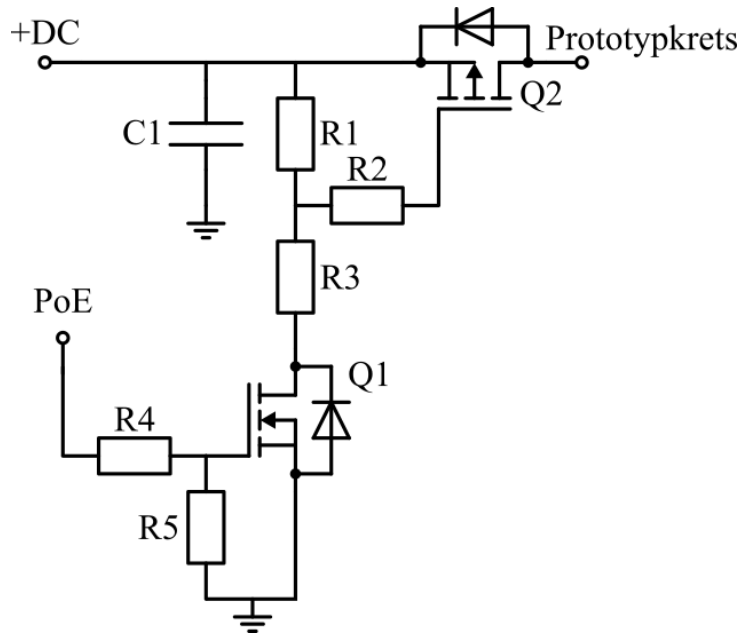
Då arbetet med utformningen av kretskort i CAD-program var svårt att dela upp beslutades det att göra två olika kort. Med två kretskort skulle de två olika tillämpningsanvisningarna för BQ24133 som anges i [11, s.26] respektive [11, s.30] kunna testas. Skillnaden mellan dem ligger i hur ingångsspänningen till BMS-kretsen är kopplad till den utgångsspänning som vidare matar systemet som backupen är kopplad till; den första tillämpningen är i princip den som illustreras i figur 4. I den andra tillämpningen finns ingen direkt strömbana från ingång till utgång så som det gör i den första tillämpningen. Då BQ24133 slår om till batteridrift då matningsspänningen till BMS:en faller till mindre än batterispänningen bedömdes det att ett mer flexibelt sätt att styra omslaget skulle behövas, där omslag till och från batteridrift istället skulle kunna ske vid en inställbar spänningsgräns. Med två olika kretskort skulle också två olika utformningar av denna kretsdel som skulle styra av- och påslag kunna testas. De båda kretsarna skulle i övrigt vara identiska med avseende på passiva kringkomponenter till boost-regulator och BMS-IC:n. De båda lösningarna för styrkretsarna redogörs för i detta avsnitt respektive avsnitt 3.3.5.

Utgångspunkten för den första styrkretsen var att hitta en styrkrets som var minimalistisk och enkel. Detta eftersom integrering underlättas ifall kretsen består av färre komponenter. Fokus hamnade på att kunna styra kretsen direkt via den reglerade PoE-matningen för att få en snabb respons då avbrott uppstod.

För att simulera olika testfall användes programmet LTspice, då detta är ett erkänt verktyg för att erhålla verklighetstroga simuleringar. En nackdel var att hela prototypen inte kunde testas i LTspice då modeller för valda IC:s saknades, fokus fick istället läggas på att ta fram styrkretsen. Flera olika möjliga lösningar

testades men vid en noggrannare analys upptäcktes brister. Kretsen som sedan togs fram uppfyllde även författarnas mål på att ha ett lågt antal komponenter.

Figur 10 illustrerar lösningen, och funktionen är sådan att då PoE-källan är i drift leder Q1 som är en nMOS. Resistorerna R4 och R5 utgör en spänningsdelare där resistansen för R4 och R5 delar spänningen över gate:n så Q1 ligger nära  $V_{gs(threshold)}$ , detta för att Q1 ska sluta leda vid en kritisk spänning. Q2 är en pMOS och leder endast då PoE-källan är i drift, vilket medför att +DC-källan kan bidra prototypkretsen med energi. Resistorerna R1 och R3 utgör en spänningsdelare där resistansen för R1 och R3 delar spänningen över gate:n på Q2 till nära 0 V då Q1 leder. När Q1 slutar leda blir spänningen över gate:n till Q2 ungefär densamma som +DC, varav Q2 slutar leda.



Figur 10: Styrkrets I. Styrningen utgörs av transistorerna Q1 och Q2.

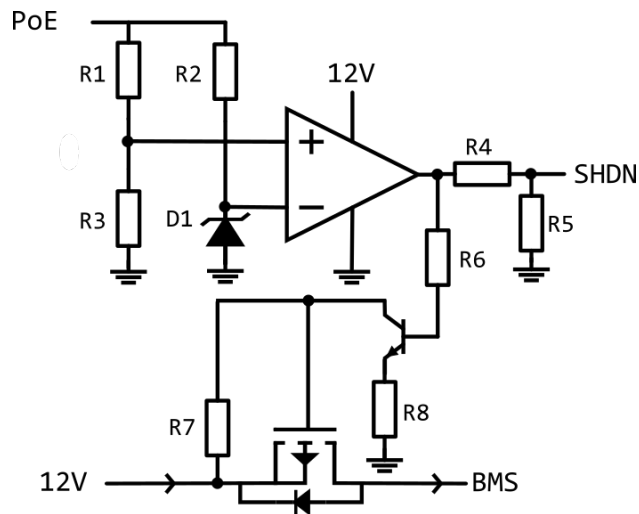
Efter möte med företagets handledare kring kredibiliteten för kretsen kunde sen en prototypkrets ta form via verktyget KiCad. KiCad är ett gratis verktyg för att ta fram en kretsdesign som har ett stort bibliotek med komponenter och deras fotavtryck, vilket är en mall som används vid PCB-design för att kunna montera komponenten på kortet.

### 3.3.5 Styrkrets II

Syftet med den andra kretslösningen var att kunna undersöka möjligheten att styra laddning och urladdning av batteriet då den primära 12 V PoE-spänningen sjunkit till en inställbar nivå lite mer precist för att kunna hitta lämplig omslagspunkt, men till priset av högre komponentantal.

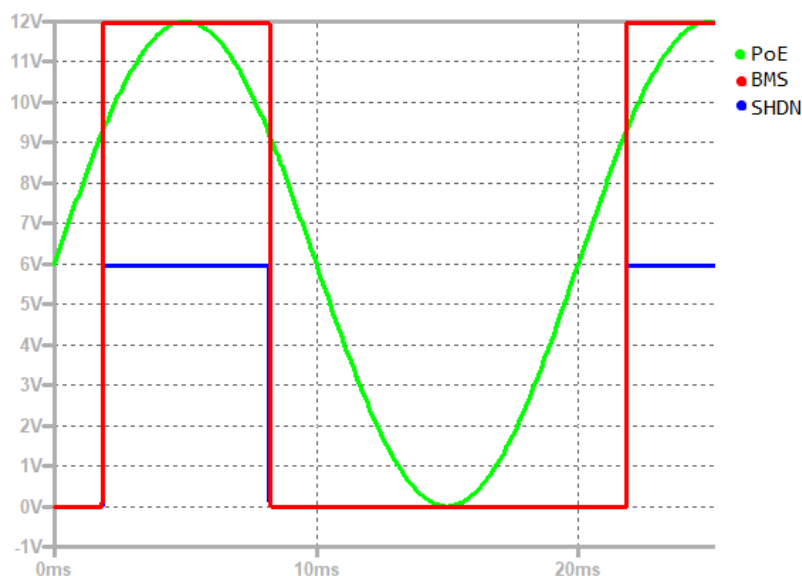
Det var även tänkt att undersöka möjligheten att få ner kretsens förluster vid laddning och urladdning av batteri genom att utesluta transistorer för power path-funktionen på det sätt som illustreras i [5, s.30]. Både BMS- och boostregulator-IC:erna har ingångar med vilka man kan slå dem av- och på. För BQ24133 sker avstängning genom att jorda ingång 13 [11, s.6] och för MAX1771 genom att ansluta ingång 4 (betecknad SHDN) till en spänning högre än 1,6 V [10, s.3]. Hög signal till SHDN på MAX1771 bryter förvisso inte strömbanan, men förluster kan minimeras genom att regulatorkretsen inte tomgångsswitchar. För att åstadkomma detta togs en komparatorkrets fram där kamerasytemets primära PoE-strömförsörjning utgör insignal, och vars utgång skulle driva IC:ernas av- och påslags-ingångar så att omslag skulle ske när PoE-matningsspänningen sjunkit till en inställbar nivå.

Tanken att styra av- och påslagsingången till BQ24133 övergavs dock då den ingången även används för inställning av andra funktioner och det fanns ingen lösning som gjorde det möjligt styra av- och på-funktion på ett sätt som garanterat inte påverkade andra funktioner. Istället valdes en lösning där komparators utgång styrde en pMOS-transistor på ingången till batteriladdningskretsen och SHDN-ingången på regulatorn. På detta sätt skulle idealt den ena kretsdelen vara avslagen då den andra är aktiv och vice versa. Figur 11 illustrerar kretsen.



Figur 11: Förenklad illustration av styrkrets II som används för att styra laddning respektive urladdning av batteriet. Komparatormen styr omslaget genom att jämföra PoE-spänningen över R3 med någon Zenerspänning.

Kretsen simulerades i LTSPice för att bekräfta önskad funktion. I simuleringen valdes D1 till en 4,7 V Zenerdiod och R1 och R3 valdes lika stora så att omslag skulle ske då den simulerade PoE-spänningen var mindre än 9.4 V. Övriga motstånd fungerar i huvudsak som strömbegränsning och för att skydda transistorgate:en respektive SHDN-ingången mot för hög spänning. I simuleringen användes en sinusvåg som signal för att undersöka om komparatorkretsen slog om som beräknat. Figur 12 visar resultatet av simuleringen.



Figur 12: Resultatet av simulering av styrkrets II.

Simuleringen bekräftar det önskade beteendet hos komparator-kretsen; när den simulerade PoE-spänningen understiger 9.4 V stänger pMOS-transistorn ingången till batteriladdningskretsen och SHDN blir låg, vilket aktiverar boostregulatorn.

### 3.4 Kretsevaluering

Utvärdering av kretsarna som togs fram utformades genom att tester utfördes med olika passiva laster. Detta för att kunna fastställa funktionaliteten hos de båda kretsarna vid olika scenarion innan kretsarna kopplades på företagets kamerasystem. Anledningarna till detta grundade sig i att evaluera konstruktionen för att vid stabila laster kunna mäta och förstå de olika funktionerna praktiskt.

Båda styrkretsarna, som var den del av prototyperna som blev designad från grunden, klarade av önskat beteende. Detta innebar att när ett avbrott skedde över PoE-källan och batteriet blev den nya energikällan, stängde styrkretsen av batteriladdningen.

Till styrkrets I valdes transistorer med åtanke på låg  $R_{ds(on)}$  för att minska förlusterna samt en låg påslagnings- samt avslagnings-tid som grundade sig i att försöka förhindra möjlig strömrusning i motsatt riktning. Från figur 10 har Q1



[12] en  $R_{ds(on)}$  på 14,2 m $\Omega$  och en  $t_f$  på 46ns. Q2 [13] har en  $R_{ds(on)}$  som är mindre än 20 m $\Omega$  och en  $t_f$  på 16ns.

De två möjliga inkopplingspunkterna som beskrivits i 3.2 testades. Som befarat gick det inte att få till en lösning så att ett system enligt figur 4 skulle kunna tillämpas, då ORing-kretsen slutade att fungera då komponenter togs bort. Korten skulle alltså få testas med inkoppling på kameran enligt figur 6. Detta gjorde styrkretsarnas justerbarhet något överflödigt då deras omslag var tvunget att ställas till samma 11,1V-omslagsspänning som kamerans ORing-krets.

### 3.5 Källkritik

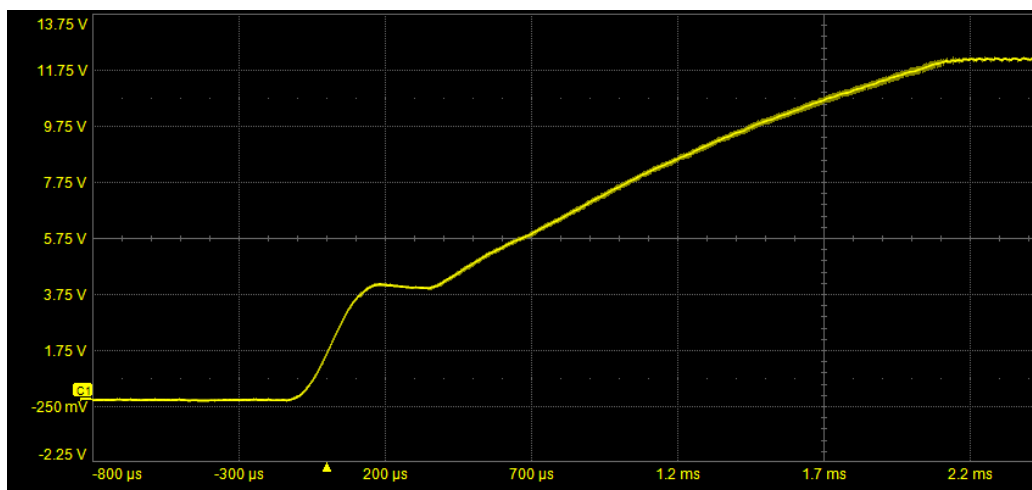
Det inte funnits några direkta anledningar att tvivla på trovärdigheten hos de källor som använts i detta examensarbete då det rör sig om datablad utgivna av komponenttillverkarna, kurslitteratur utgiven av större förlag eller tekniska artiklar publicerade av större marknadsaktörer.

## 4 Resultat

I detta avsnitt redovisas resultaten av de oscilloskopmätningar som gjordes då prototypkretsarna kopplades in på kameran på det sätt som visas i figur 6.

### 4.1 Boostregulatorn

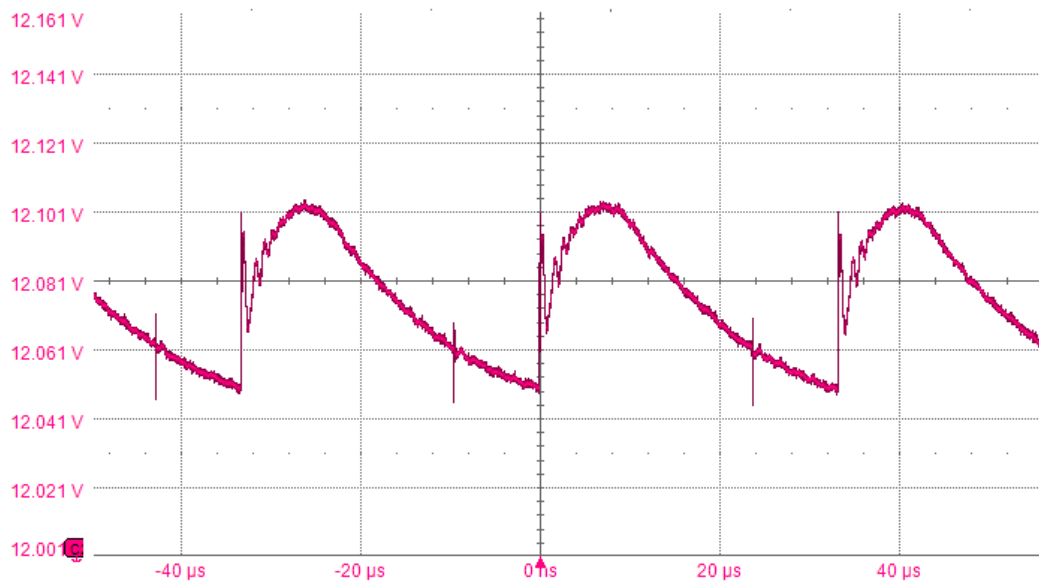
Figur 13 visar boostregulatorns stigtid från 0V till 12V då den matade kameran under typisk last så som angivet i avsnitt 3.2.2.



Figur 13: Boostregulatorns stigtid från 0V till 12V vid 7W uteffekt.

Stigtiden visade sig vara för lång för att kamerans ORing-styrkrets skulle kunna slå om till batteridrift då PoE-matning togs bort. Idén att styra av- och påslag med styrkrets II komparator fick alltså förkastas, och boost-regulatorns SHDN-anslutning fick istället jordas så att regulatorn switchade hela tiden.

Figur 14 visar boost-regulatorns utgångsrippel under samma last.



Figur 14: Boostregulatorns utgångsspänningrippel vid 7W uteffekt.

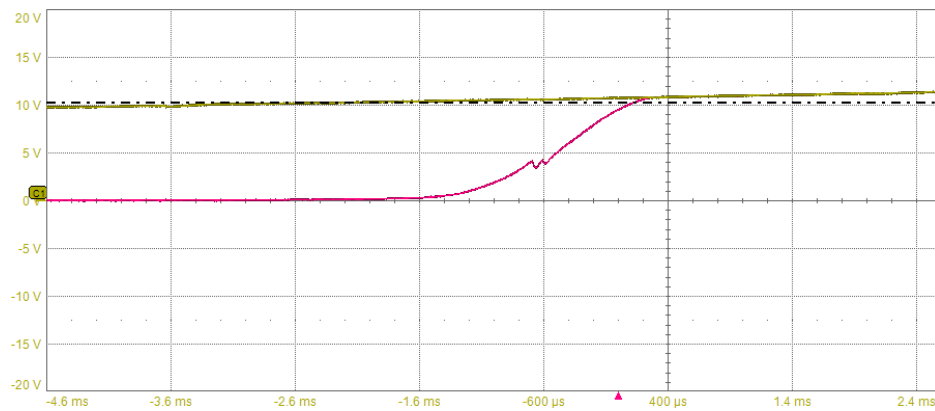
Ripplet uppmättes till 58mV top-till-topp. Detta är gott och väl inom marginalen för den tolerans på  $\pm 0,5V$  som har satts för kamerans två 12V-regulatorkretsar. Orsaken till spikarna i utspänningen har inte undersökts närmre.

## 4.2 Styrkretsar

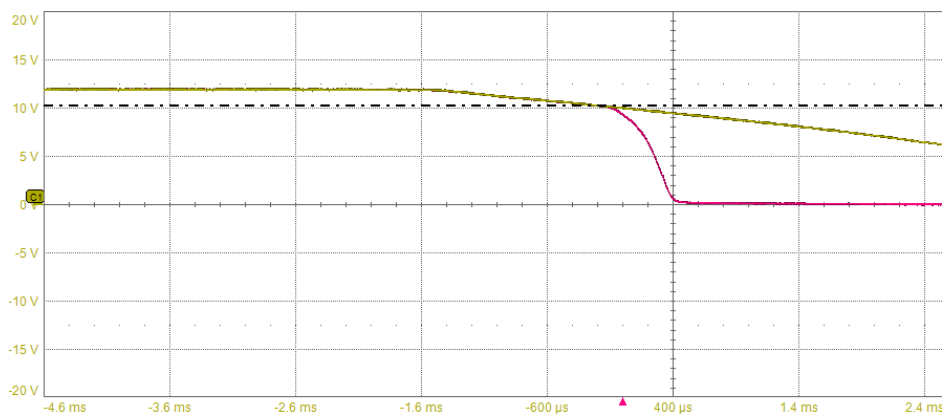
I figur 15-18 visas mätningar utförda på respektive styrkrets, där kanal ett (gul) representerar PoE-källan samt kanal två (rosa) representerar +DC-källan efter styrkretsen. Omslagen mellan de olika källorna bör ske vid 11,1 V.

Figur 15 och 16 representerar styrkrets I och fallen då PoE-källan aktiveras respektive stängs där DC-källans matning till kretsen är av intresse. Omslag sker vid 10,6 V och beror på spänningsintervallet som omslaget behöver ske på, vilket medför begränsningar hos spänningsdelningen.

Under tidsspannet ser PoE-källan linjär ut och detta beror på att ur- och uppladdningstiden ligger på ca 500ms på grund av ur- och uppladdning av kondensatorer vars placering är på PoE-nätet.

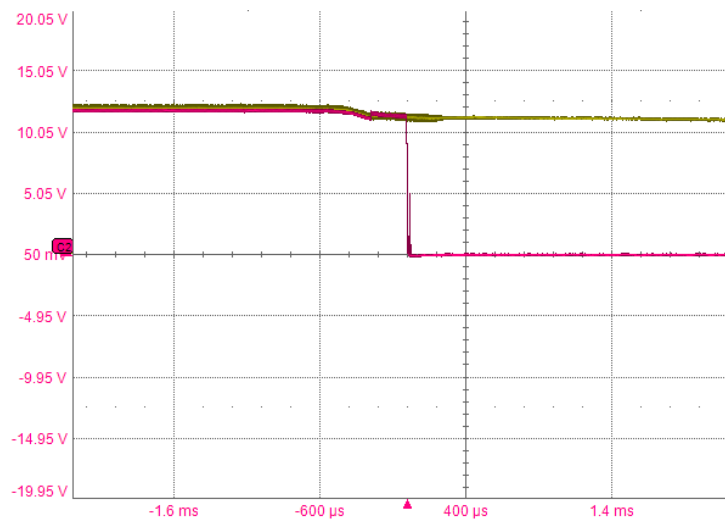


Figur 15: Omslag från batteridrift till PoE-matning med styrkrets I. kanal ett (gul) representerar PoE-källan samt kanal två (rosa) representerar +DC-källan efter styrkretsen.

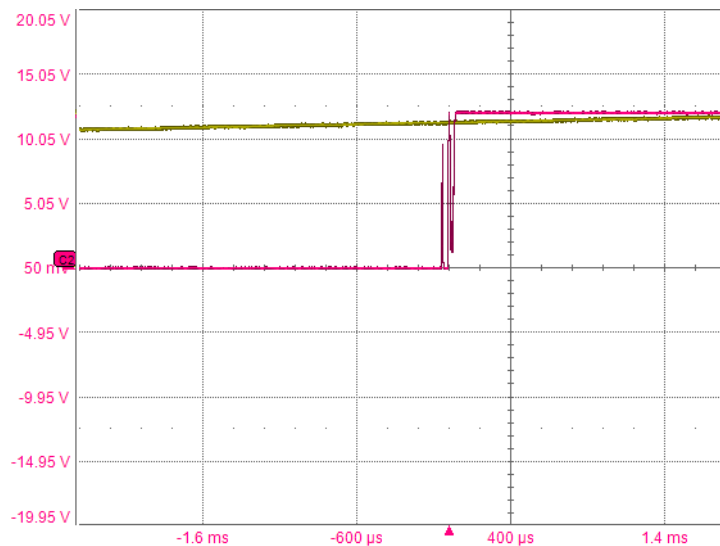


Figur 16: Omslag från PoE-matning till batteridrift med styrkrets I. kanal ett (gul) representerar PoE-källan samt kanal två (rosa) representerar +DC-källan efter styrkretsen.

Figurer 17 och 18 visar PoE-spänningen och styrkrets II komparatorutgång vid ur- respektive inkoppling av PoE-spänningen.



Figur 17: Omslag från PoE-matning till batteridrift vid styrkrets II. Gult spår visar PoE-spänningen och rosa spår visar komparatorns utgång

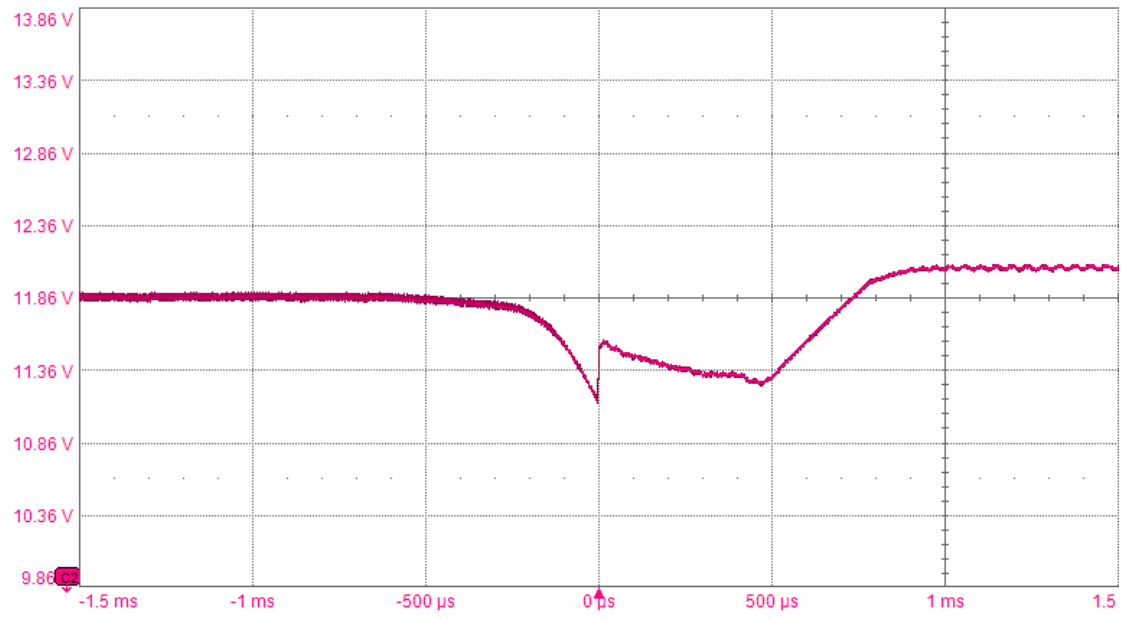


Figur 18: Omslag från batteridrift till PoE-matning vid styrkrets II. Gult spår visar PoE-spänningen och rosa spår visar komparatorns utgång

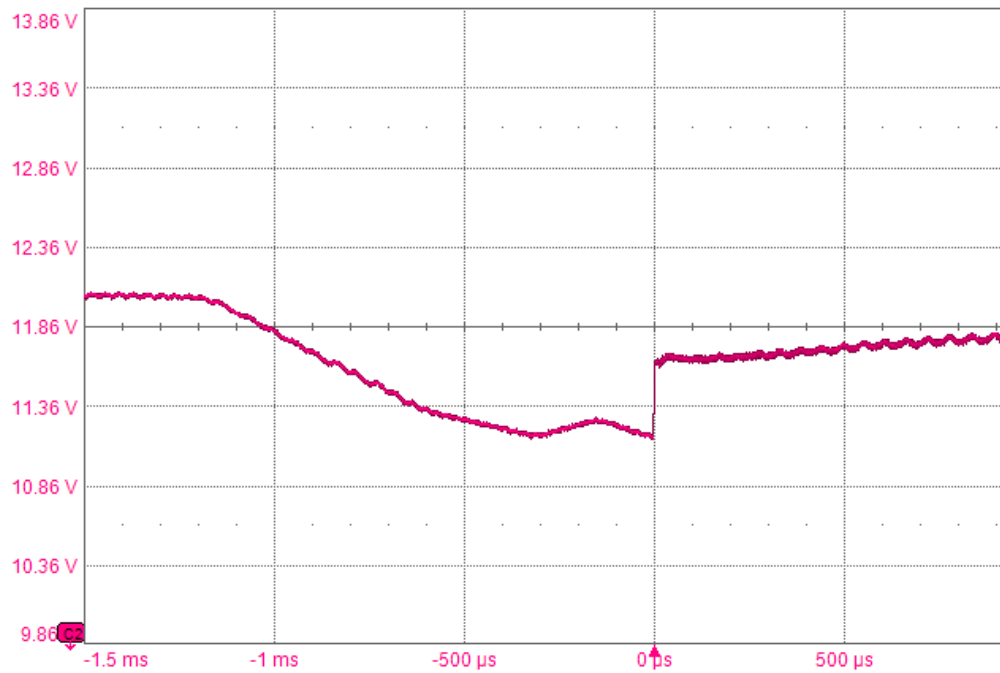
Olika nivåer av sving i utgångssignalen noteras vid övergång. Detta skulle kunna tänkas bero på inverkan av strökapacitans mellan ingångarna då den differentiella spänningen mellan dem blir låg. Detta verkar inte ha påverkat kretsfunktionen i övrigt. Positiv feedback med smalt hysteresband hade kanske kunnat avhjälpa detta.

### 4.3 Kamerans ORing-krets vid omslag

Figurer 19 och 20 visar utgången på kamerans ORing-krets vid omslag till respektive från batteridrift.



Figur 19: Omslag från PoE-matning till batteridrift vid ORing-kretsens utgång.

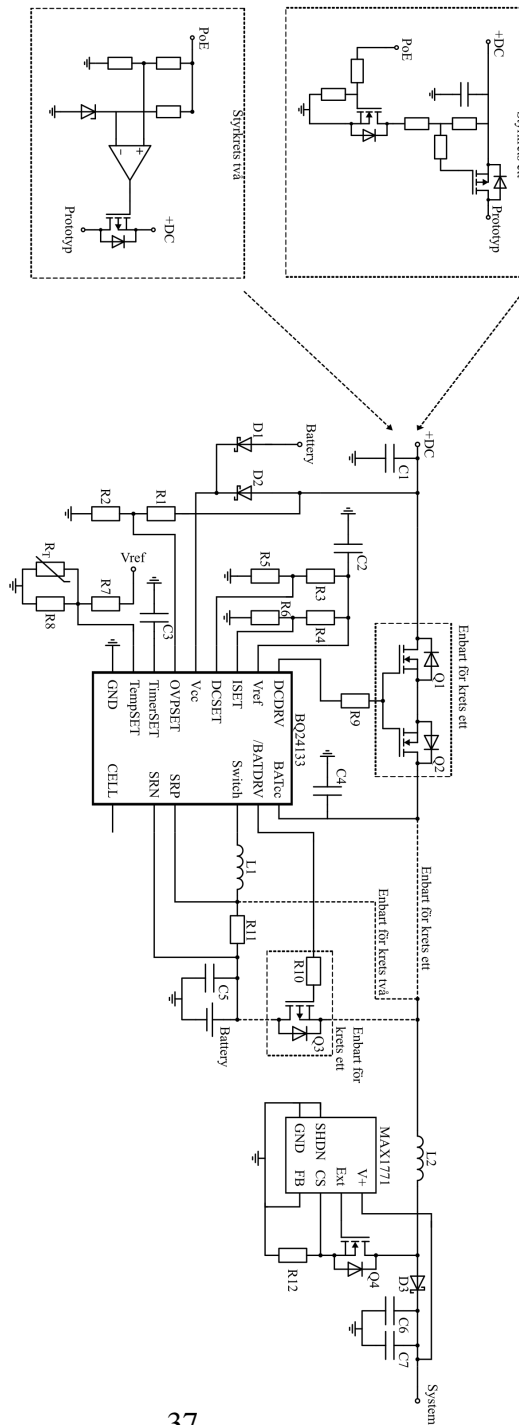


Figur 20: Omslag från batteridrift till PoE-matning vid ORing-kretsens utgång.

Vid omslag till batteridrift noteras en spänningssänka i figur 19. Troligtvis är detta regulatorns svar på den laststörning som omslaget utgör. Detta verkar inte ha påverkat kamerans funktion vid övergången, men det är osäkert om regulatorn hade klarat av att driva en kamera som förbrukar maxeffekt enligt PoE-klass 4 med detta stegsvar.



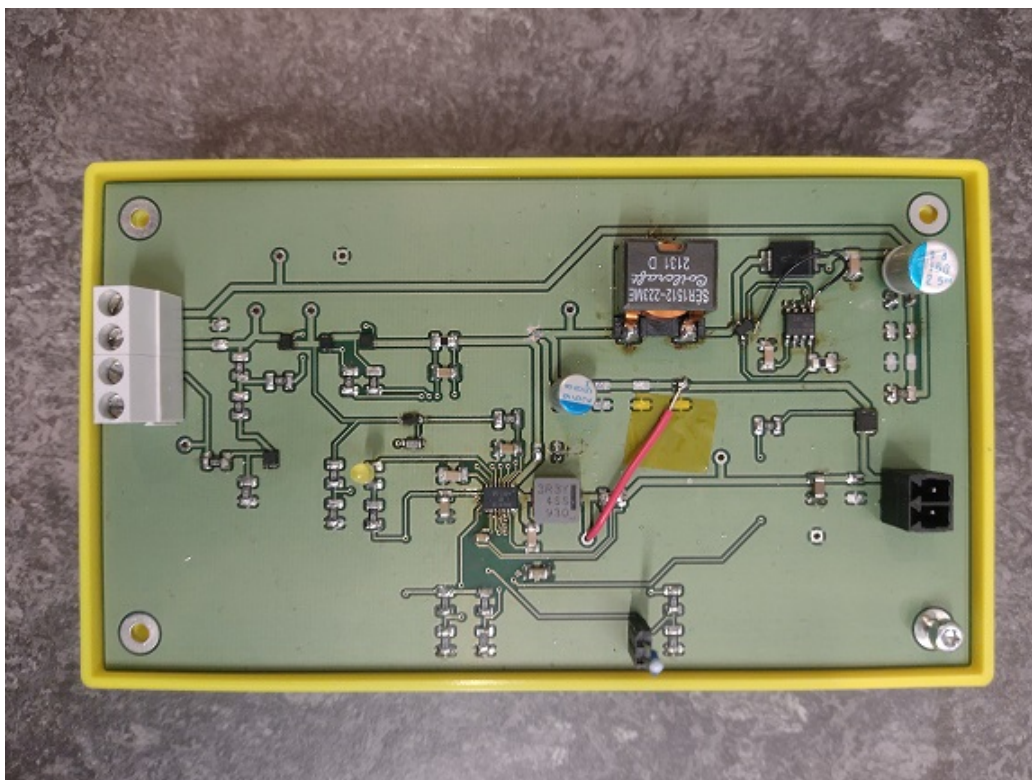
## 4.4 Slutgiltig krets



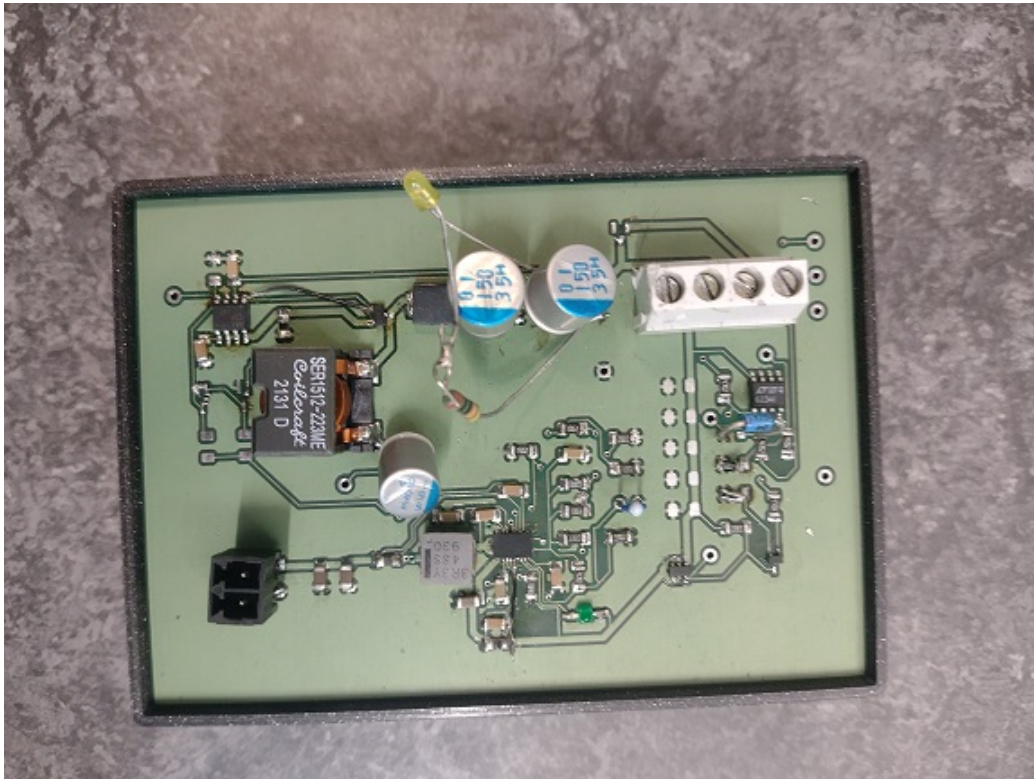
Figur 21: Slutgiltig schema något förenklat, inklusive författarnas olika lösningar.

Figur 21 illustrerar kretsen som alla tester utfördes på och visar de väsentliga komponenterna. De viktiga externa säkerhetsfunktionerna är ISET och TempSET. Resistorerna R4 och R6 utgör spänningsdelare till anslutningen ISET vilken ger en strömbegränsning på 1,3 A, eller 0,5C av battericellens kapacitet, ut till Switch-nätet. Resistorerna R7, R8 och  $R_T$ , där  $R_T$  är en NTC-termistor, är anslutna till TempSET och möjliggör att laddning av batteriet sker i temperaturintervallet 0°C till 45°C.

Figureerna 22 och 23 visar de två kretskorten med monterade komponenter. Batteriet ansluts vid kortens svarta två-poliga terminaler. Den hängande LED:en på det andra kortet monterades i efterhand för att få en indikation på när boost-regulatorn matar kameran.



Figur 22: Kretskortsdesign I.



Figur 23: Kretskortsdesign II.

## 5 Slutsats

I detta kapitel presenteras slutsatser och diskussion kring de olika problemställningarna från avsnitt 1, samt möjliga framtida lösningar till den framtagna kretsen och till företagets system.

### 5.1 Diskussion

Litiumbatterier har bland annat bättre energiegenskaper, effektivitet och livslängd vilket visas i tabell 2 och tabell 4. Således är litiumbatterier den mest lämpliga batteritypen för projektets tillämpning men även generellt för en inbyggd batteribackup till en nätverkskamera. Detta under förutsättning att kameran systemet är i en miljö där temperaturen inte understiger  $-20^{\circ}\text{C}$ . I ett sådant scenario skulle Ni-Cd batterier kunna ersätta litium-ion batterierna.

Slutsatsen blir att i de flesta miljöer där kameran systemen är installerade, är också temperaturen oftast över  $-20^{\circ}\text{C}$  och därför lämpade sig litium-ion som det bästa alternativet.

Att inom tidsramen för detta examensarbete lyckas designa en batteribackup-krets som lever upp till de EMC-krav som ställs på elektronikprodukter skulle möjligtvis vara genomförbart. Prototypkretsarna som blev konstruerade hade förberedande komponentyta för störningsdämpande komponenter såsom kondensatorer och ferriter. Däremot blev arbetet uppbromsat av långa leveranstider, vilket inträffade i det kritiska slutskedet då allting skulle testas. På grund av detta fanns det inte tid till att göra EMC-tester så som inplanerat.

Då det inte gick att testa systemet med en typisk inkoppling av batteribackupen enligt figur 4, så som diskuterats i 3.2.1, fick gränsen för underspänning sättas till samma 11,1 V-omslagsspänning som kamerans ORing-krets. Detta gjorde styrkretsarnas ställbarhet något överflödigt, och det hade troligtvis varit lämpligare att använda sig av kamerans ORing-krets signalering för till- och frånslag. Detta testades inte då styrkretsarna inte var utformade så att signalerna för av- och påslag från kamerans ORing-krets gick att använda utan att grundligt ändra utformningen på styrkretsarna.

Två system designades och flertal tester utfördes där båda kretsar lyckades uppfylla kraven för projektet. Det var vissa designmässiga val som skiljde de båda kretsarna åt, se figur 21.

Krets ett följde en typisk applikation ifrån BMS-IC:ns datablad [11, s.26], vilket innebär att energikällan vid ingångsterminalen var direkt i serie ansluten med utgången till systemet, ett typiskt utseende för en batteribackup som finns i

till exempel mobiltelefoner eller datorer. När krets ett var kopplad till ett nätaggregat för att utföra tester på de olika funktionerna, fungerade allting som tänkt. Då PoE-källan försvann stängde styrkretsen av matningen vidare in i kretsen vilket också blockerade spänningen som systemutgången matade tillbaka. Batteriladdningen fungerade och laddade batteriet med en algoritm som förser batteriet först med konstant ström med ökande spänning, för att sedan gå över till konstant spänning med avtagande ström. Boost-konverteraren höll spänningen konstant på samma nivå som spänningen vid ingångsterminalen då denna var i drift och konverterade upp spänningen till en jämn signal då batteridriften tog vid.

Däremot uppstod det problem när krets ett anslöts med företagets kamerasystem. När PoE-källan är i drift är denna också +DC-källan, se figur 6. Vidare är PoE-källans elektroniska design utformad till en strömbegränsning på 1,9 A vilket skapade komplikationer för krets ett. Detta eftersom boost-kretsen är direkt kopplad till ingångsterminalen, krävs det en hög ström för att ladda upp utgångskondensatorerna. PoE-källan bröt anslutningen och försökte starta om med samma resultat vid varje iteration.

Ledaren som ansluter BMS-nätet med boost-nätet togs bort för att efterlikna den typiska applikationen [11, s.30], detta för att minska inrusningsströmmen genom boost-konverteraren från PoE-källan. Åtgärden resulterade i att då kamerasystemet startas upp och krets ett startar begränsas strömmen ut till boost-konverteraren på grund av ISET anslutningen på BMS-ICn och resterande ström som krävs för att ladda upp utgångskondensatorerna dras ifrån batteriet. Därefter fungerade även krets ett med kamerasystemet.

Den andra kretsen var utformad enligt den andra typiska tillämpningen i databladet och fungerade i stort som avsett både vid test med testlast med matning via labbaggregat, och då den var inkopplad på kameran. En ändring som fick göras var att jorda boost-regulatorns SHDN-ingång så att den switchade hela tiden då dess stigtid var för lång för att kunna ta över matningen tillräckligt snabbt. Då kameran startades direkt med batteriet blev startströmmen dock väldigt hög. Detta hade troligtvis kunnat avhjälpas genom att ta bort en del större elektrolytkondensatorer som satt vid testpunktanslutningen på kamerakortet där regulatorns utgång var ansluten. Detta gjordes inte på grund av risken att förstöra något på kortet.

Själva laddningen av batteriet fungerade som avsett; laddningen startade när PoE-matning anslöts och batteriet laddades då med maximalt den laddningsström som ställts in med spänningsdelaren på BMS-IC:ns ISET-ingång upp till 8,4V, som är den maximala spänningen som två litiumceller i serie får laddas upp till.

Slutsatsen blir därmed att med befintlig version av de båda kretsarna fungerar design två bättre då boost-konverteraren är isolerad från PoE-källan. Däremot

vid en framtida lösning är design ett troligtvis lämpligare eftersom enbart en energikälla då skulle användas för matning av batteribackupen, vilket diskuteras i 5.2.

## 5.2 Framtida utvecklingsmöjligheter

Prototypen har flera förbättringsmöjligheter och den krets som designades och presenterades i 3.3 hade vid en framtida implementering kunnat ändrats avsevärt. Dessa ändringar är batterimodell, styrkrets, Power Path-funktion samt val av boostkonverterare. Utöver ändringarna skulle det även krävas en ny kretsdel som kontrollerar och reglerar bland annat batteri-underspänningsskydd samt batteribalansering om detta inte redan finns i battericellerna.

I en framtida lösning skulle styrkretsen troligtvis inte behövas då den enda strömmatningen till systemet skulle vara PoE, utan möjligheten att systemutgången från befintlig prototypkrets blir återkopplad till +DC-ingången, vilket hade förenklat utformningen av kretsen och minskat uppkomsten av möjliga fel. I stora drag skulle det varit möjligt att direkt använda den typiska applikationen från BQ24133 [11, s.26] med tillägg för boost-konverterare och inställning av omslagstid.

Boost-konverterarens användning av PFM innebar att ett högfrekvent ljud genererades inom frekvensområdet för vad människor kan ta upp. I stället hade en boost-IC med pulsbredmodulering används. Placeringen av boost-ICn för design ett hade i stället placerats under pMOS:en som drivs av BATDRV vid batterinätet, detta för att minska onödig spänningskonvertering. Utöver detta skulle en sådan placering innebära en lägre strömrusning vid uppstart av kretsen eftersom färre kondensatorer behövt bli laddade från PoE-källan. Denna extra energi skulle i stället vara möjligt att få ifrån batterierna som inte har samma strömbegränsning. Denna lösning hade främjat användningen av den typiska applikationen från BMS [11, s.26].

Möjligtvis hade en extra pMOS kunnat monterats under boost-ICn för att isolera kretsen helt då PoE-källan förser systemet med energi och undvika att ICn stör batteriladdningen. Enligt 3.4 finns transistorer vars  $R_{ds(on)}$  är så pass låg att effektförluster kan försummas i de flesta scenarier.

De flesta boost-IC kan reglera sitt till- och framtillstånd med en enable-anslutning på ICn. Detta skulle kunna vara ytterligare en lösning där boost-ICn var styrd från en mikrokontroller och därmed kunna programmeras på ett sätt som håller boost-konverteraren avstängd då primär spänningskälla finns. Dessa egenskaper för styrning finns redan på befintliga kamerasystem från företaget, men

under tidsramen för projektet fanns ingen möjlighet att även programmera om en mikrokontroller. Detta förutsätter dock att regulatorn är tillräckligt snabb.

BMS-ICn presterade väl i alla tester och hade troligtvis kunnat användas i en uppdaterad prototyp och möjligtvis även integrerats i företagets befintliga system. Anledningen är att BQ24133 har alla övervakningsfunktioner som krävs för att på ett säkert sätt ladda och hantera litiumbatterier. En brist hos BMS-ICn är att funktioner för underspänningsskydd och överströmskydd vid urladdning inte finns och en sådan skyddskrets hade behövts implementerats. Det saknas även en batteribalanseringskrets. Batteribalansering behövs i system med flera celler för att alla celler ska erhålla samma spänningsnivåer under laddningsförloppet. Utan balanseringskrets förkortas cellernas livslängd. Avsaknad av balansering kan även utgöra en risk för överladdning av enskilda celler. Vid lägre PoE-klasser än klass 4 skulle möjligtvis en ensam battericell kunna användas. Man hade då kommit ifrån behovet av balanseringskrets.

Batteriernas utformning var cylindrisk, vilket inte lämpar sig särskilt väl för produkter där fritt utrymme är sparsamt. För en framtida design hade antingen chassit till de produkter batteribackupen ska integreras med fått göras större, alternativt skulle en batterimodell av prismatisk form kunna vara en lösning.

Om en batteribackup hade ersatt kamerans externa DC-matningen skulle i princip kamerans ORing-krets kunnat tas bort, då behovet av att ställa in prioritering och dylikt inte behövts eftersom det ligger i en backups natur att den aldrig har prioritet framför primär matning. Systemet hade då troligtvis kunnat implementeras så som det ser ut i laptop-datorer och liknande med den typiska utformning som diskuterats. Viss signalering till kamerans övriga kretsdelar hade troligtvis behövts men det hade sannolikt kunnat åstadkommas även utan ORing-kretsen så som den ser ut nu.

### **5.3 Reflektion över etiska aspekter**

Även om övervakning kan utgöra en samhällsnytta, är det också förknippat med diskussioner om personlig integritet. Kameraövervakning kan till exempel vara nödvändigt för att skydda viktiga samhällsfunktioner eller användas i brottsförebyggande syfte. I demokratiska stater finns det lagstiftning som ska skydda individen från integritetskränkande användning av kameraövervakning. I icke-demokratiska stater kan övervakning vara ett medel för kontroll över individer på ett sätt som inte hade varit tillåtet i en liberal demokrati. I slutändan är det hur och av vem tekniken används som avgör om övervakningen är problematisk.

Batterier är en förutsättning för att många av våra mest använda apparater

ska fungera. Dagligen använder många till exempel smartphones och bärbara datorer, där sekundära Litium-ion-batterier ofta återfinns. De används även som stöd vid elproduktionen hos sol- och vindkraftverk eftersom de i dagsläget inte har förmågan att producera tillräckligt med energi dygnet runt [14].

Med människans batterianvändande kommer inte enbart fördelar i form av teknologi och modernisering. Det innebär också en del nackdelar, inte minst för naturen och vår planet. För att utnyttja råvaran som krävs, främst litium och kobolt, krävs stora mängder av energi och vatten. Majoriteten av kobolt, som är den primära råvaran i en elektrolyt, återfinns i den Demokratiska Republiken av Kongo. Kobolt utvinns primärt i gruvor, där barnarbete förekommer. Litium utvinns främst från saltöknar i Argentina och Chile, där materialet bryts med stora mängder vatten. Litium kan även utvinnas genom att utsätta materialet för höga temperaturer, vilket kräver stora mängder energi [14].

För att förbättra förutsättningarna för såväl miljö som människor krävs det stora förändringar som ställer krav på batteriindustrin. En viktig del vore att snabbt öka industrins kapacitet för återanvändning av redan existerande litium-batterier. Detta för att minska trycket på att extrahera nya råvaror, vilket i längden även minskar efterfrågan i gruvan och därmed bidrar i mindre utsträckning till barnarbete. Dock bör beaktande även tas för att de redan utsatta människorna som arbetar i gruvan då får mindre arbete att utföra och mindre mat på bordet. Därför är arbetet i gruvan essentiellt där arbetsvillkor och mänskliga rättigheter behöver tillgodose. Något som kan bli en utmaning för alla parter.

Inom EU kräver man att företag ska samla in batterier vid slutet av dess brukbara tid, för att antingen återanvändas i annat syfte eller för att återvinnas. I dagsläget innebär kravet att 45% av alla batterier i EU ska återanvändas eller återvinnas, men få av dessa är litium-ion batterier. Detta beror på att apparater som använder litiumbatterier är inbyggda och svåra att demontera, samt på att de exporteras ut ur EU för återanvändning eller försäljning. Till år 2030 vill EU att 70% av alla batterier ska ha återanvänts eller återvunnits [14].

När batterier förbättras blir även den brukbara livslängden längre och sådana krav för insamling kan ge oönskade konsekvenser. Dessa kan bland annat vara att företag som samlar in batterierna behöver uppnå EU-kraven och till följd av detta samlar in fullt brukbara batterier, trots att de fortfarande har en god kapacitet. Ytterligare konsekvenser kan bli att företag i EU importerar återvunnet material från i huvudsak Kina och Sydkorea, vilket ökar koldioxidavtrycket vi människor lämnar [14].

Utan faktiska åtgärder där faktorer som miljö och mänskliga rättigheter tas tillvara och blir till ett krav, kommer batterier fortsatt orsaka onödigt stor nega-



tiv påverkan på miljö och människor. Detta eftersom ekonomiska aspekter och girighet då tillåts att prioriteras. För att ha en framtid med låga koldioxidutsläpp är batterier ett måste. Vilket innebär att det ligger i allas intresse att batterierna tillverkas på ett rent och hållbart sätt.

## 6 Appendix

### 6.1 Termer

Batteritekniska termer:

**C-värde** - Anger strömmen som en cell laddas eller urladdas med. Vilket säger att då en battericell vars kapacitet vid kontinuerlig drift är 1000 mAh och en ström appliceras externt på 0.5C, där C är C-värdet, betyder detta att 500 mA återinförs in i battericellen. C-värdet anger också vilken tid en battericell kan leverera en viss ström. Detta innebär att en cell med en kapacitet på 1000 mAh och som urladdas med 1C kan leverera 1 A i en timme [5, s.266].

**Energidensitet** - är kvoten mellan tillgänglig energi från ett batteri och dess volym (Wh/L) [5, s.266].

**Kapacitet** - är battericellens märkström mätt i [Ah] och representerar hur länge en fulladdad cell kan urladdas med en ström. En battericell på 1000 mAh är då cellens kapacitet.

**Laddningsström** - är den ström som från en extern energikälla appliceras till ett batteri.

**Minneseffekt** - betyder att battericellens uppbyggnad gör att batteriet minns förra laddningens uppnådda energinivå. Då ett batteri med denna egenskap laddas upprepade gånger, men aldrig till full kapacitet förlorar batteriet annars brukbar energi. Vilket innebär att ett sådant batteri behöver bli helt urladdat innan det laddas på nytt för att inte försämra kapaciteten [5, s.267].

**Specifik energi** - är kvoten mellan tillgänglig energi från ett batteri och dess vikt (Wh/kg) [5, s.268].

**Urladdningskapacitet** - antyder hur mycket ström en cell kan utnyttja vid given spänning, vilket innebär att vissa battericeller kan avge en större mängd elektroner vid en specifik spänning än andra battericeller.

**Urladdningsström** - antyder till vilken nivå en battericell kan hantera en ström ut från cellen utan att ta skada under ett fåtal urladdningar.

**Överladdning** är då en battericell blir utsatt för en laddningsström som ligger över cellens kapacitet.

## Källförteckning

- [1] William P Crowell et al. *Physical and Logical Security Convergence*. Elsevier Inc., 2007. ISBN: 978-1-59749-122-8.
- [2] Sanjaya Maniktala. *Power Over Ethernet Interoperability Guide*. McGraw Hill, 2013. ISBN: 978-0-07-179826-6.
- [3] Fluke Networks. *A Guide to Successful Installation of Power over Ethernet*. URL: <https://www.flukenetworks.com/edocs/poe-installation-guide>. (läst 03-03-2022).
- [4] Martin Patokas. *Fundamentals of power system ORing*. URL: <https://www.eetimes.com/fundamentals-of-power-system-oring/>. (läst 07-04-2022).
- [5] Gianfranco Pistoia. *Batteries for portable devices*. Elsevier Science, 2005. ISBN: 9780080455563.
- [6] CyrilB commonswiki. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Boost\\_operating.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Boost_operating.svg). Licens CC BY-SA 3.0.
- [7] *Li - Ion Battery 3.6V 2600mAh with Protection Board (PCB) inside*. Ansmann. Dec. 2017. URL: [https://www.elfa.se/Web/Downloads/\\_t/ds/1307-0000\\_eng\\_tds.pdf](https://www.elfa.se/Web/Downloads/_t/ds/1307-0000_eng_tds.pdf). (läst 1-04-2022).
- [8] Steven Keeping. *The Advantages of Pulse Frequency Modulation for DC/DC Switching Voltage Converters*. URL: <https://www.digikey.com/en/articles/the-advantages-of-pulse-frequency-modulation-for-dc-dc-switching-voltage-converters>. (läst 17-05-2022).
- [9] Barry W Williams. *POWER ELECTRONICS Devices, Drivers, Applications, and Passive Components*. 2006. ISBN: 978-0-9553384-0-3.
- [10] *12V or Adjustable, High-Efficiency, Low IQ, Step-Up DC-DC Controller*. Maxim Integrated. Mar. 2002. URL: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX1771.pdf>. (läst 10-04-2022).
- [11] *Stand-Alone 1- to 3- Cell 2.5A Synchronous Buck Battery Charger With Integrated MOSFETs and Power Path Selector*. Texas Instruments. Dec. 2020. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq24133.pdf?ts=1648578112857>. (läst 10-04-2022).
- [12] *MOSFET - Power, Single N-Channel, WDFN6*. ON Semiconductor. Jan. 2020. URL: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/ntljs3d0n02p8zd.pdf>. (läst 10-04-2022).

- [13] *P-Channel 30 V (D-S) MOSFET*. Vishay Siliconix. Apr. 2019. URL: <https://www.mouser.se/datasheet/2/427/sia483adj-1766775.pdf>. (läst 12-04-2022).
- [14] Nature 595 7 (2021). *Lithium-ion batteries need to be greener and more ethical*. URL: <https://www.nature.com/articles/d41586-021-01735-z>. (läst 19-05-2022).