



CHALMERS



Batteridimensionering för busslinje 64 i Göteborg

Kandidatarbete inom civilingenjörsprogrammet Elektroteknik

Anton Bruun, Axel Åkerblom, David Pettersson,
Erik Gennemark, Robert Langundzic, Victor Ljungqvist

INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg 2026

www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2026

Batteridimensionering för busslinje 64 i Göteborg

Anton Bruun, Axel Åkerblom, David Pettersson,
Erik Gennemark, Robert Langundzic, Victor Ljungqvist



CHALMERS

Institutionen för ELEKTROTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2026

Batteridimensionering för busslinje 64 i Göteborg

© Anton Bruun, Axel Åkerblom, David Pettersson,
Erik Gennemark, Robert Langundzic, Victor Ljungqvist, 2026.

Handledare: Emma Grunditz, Avdelningen för Elkraftteknik
Examinator: Jimmy Ehnberg, Avdelningen för Elkraftteknik

Kandidatarbete 2026
Institutionen för Elektroteknik
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Buss från Västtrafik parkerad vid Heden i Göteborg redigerad med
Google Gemini.

Skriven i L^AT_EX
Göteborg 2026

Battery sizing for bus line 64 in Gothenburg
Anton Bruun, Axel Åkerblom, David Pettersson,
Erik Gennemark, Robert Langundzic, Victor Ljungqvist
Institutionen för Elektroteknik
Chalmers Tekniska Högskola

Abstract

The transition of the transport sector towards electrification is a critical component for achieving national and global climate goals. For public transport in Gothenburg, this entails a shift from internal combustion engines to battery-electric buses, placing high demands on precise battery sizing to balance vehicle weight, lifespan, and environmental impact. This bachelor's thesis investigates optimal battery sizing for bus line 64 in Gothenburg by evaluating energy requirements and battery health under realistic driving conditions. The work is based on empirical driving data collected via GPS measurements, which form the basis for a simulation model of vehicle dynamics and power demand. The battery system is modeled using a Dual Polarization (DP) equivalent circuit to achieve high accuracy in voltage and State of Charge (SoC) estimation. The degradation of the battery's State of Health (SoH) is simulated using the Olmos degradation model for NMC chemistry, considering factors such as C-rate, depth of discharge (ΔSoC), and mean State of Charge (mSoC). Four sizing scenarios are evaluated under realistic operating conditions. The results show that aggressive SoC intervals and high C-rates during opportunity charging lead to unsustainably rapid degradation. The study concludes that Case 3, with a nominal battery capacity of 190.9 kWh and a narrow operational SoC window of 10–30 %, is the most optimal configuration for line 64. This strategy results in an estimated lifespan of approximately 7.4 years and minimizes the total climate impact to 143 tons of CO_2e over a 20-year period by reducing the frequency of battery replacements without burdening the vehicle with excessive mass.

Sammandrag

Transportsektorns omställning mot elektrifiering är en kritisk komponent för att nå nationella och globala klimatmål. För kollektivtrafiken i Göteborg innebär detta ett skifte från förbränningsmotorer till batteridrivna elektriska bussar, vilket ställer höga krav på noggrann batteridimensionering för att balansera fordonets vikt, livslängd och miljöpåverkan. Detta kandidatarbete undersöker optimal batteridimensionering för busslinje 64 i Göteborg genom att utvärdera energibehov och batterihälsa under realistiska körförhållanden.

Arbetet baseras på empirisk kördata insamlade via GPS-mätningar, vilka ligger till grund för en simuleringsmodell av fordonets dynamik och effektbehov. Batterisystemet modelleras med ett ekvivalent kretsschema av typen Dual Polarization (DP) för att erhålla hög noggrannhet i spännings- och SoC-estimering (State of Charge). Degraderingen av batteriets hälsotillstånd (State of Health, SoH) simuleras med hjälp av Olmos degraderingsmodell för NMC-kemi, där faktorer som C-rate, urladdningsdjup (ΔSoC) och genomsnittlig laddnivå (mSoC) beaktas. Fyra dimensioneringsscenarier utvärderas under realistiska driftförhållanden. Resultaten visar att aggressiva SoC-intervall och hög C-rate vid ändstationsladdning leder till en ohållbart snabb degradering. Studien konkluderar att fall 3, med en nominell batterikapacitet på 190,9 kWh och ett smalt operativt SoC-fönster på 10–30 %, är den mest optimala konfigurationen för linje 64. Denna strategi medför en beräknad livslängd på ca 7,4 år och minimerar den totala klimatbelastningen till 143 ton CO_2e över en 20-årsperiod genom att reducera frekvensen av batteribyten utan att belasta fordonet med överdriven massa.

Tackord

Vi vill rikta ett stort tack till vår handledare Emma Grunditz, forskare vid avdelningen för elkraftteknik på Chalmers tekniska högskola, för värdefull vägledning och stöd under arbetets gång.

Beteckningar

Nedan finns listan på de beteckningar som används genomgående i rapporten:

SoC	State of Charge
SoH	State of Health
FEC	Full equivalent cycles
OCV	Open Circuit Voltage
NMC	Litium-Nickel-mangan-koboltoxid
LFP	Litium-järn-fosfat
ECM	Ekvivalenta kretscheman
DP	Dual Polarization
CO_2e	Koldioxidekvivalenter
CCCV	Constant-Current-Constant-Voltage
BMS	Batterihanteringssystem
HvC-PD	Panto Down Takladdningssystem



Notationer

Nedan presenteras de notationer som använts i rapporten. Dessa innefattar parametrar med dess enheter och beskrivning.

Notationer

Symbol	Beskrivning	Enhet
Fordonsdynamik och krafter		
F_{hjul}	Total kraft på hjulen	N
F_{luft}	Luftmotstånd	N
F_{rull}	Rullmotstånd	N
F_a	Accelerationskraft	N
F_g	Lutningsmotstånd (gravitationskraft)	N
C_d	Luftmotståndskoefficient	-
C_r	Rullmotståndskoefficient	-
δ	Rotationsmassafaktor	-
h_{buss}	Bussens höjd	m
b_{buss}	Bussens bredd	m
A	Frontarea av buss	m ²
v	Hastighet	m/s
m_{tot}	Bussens totala massa	kg
m_{buss}	Bussens totala massa utan batteripaket	kg
α	Vägens lutning	rad
g	Tyngdacceleration	m/s ²
a	Acceleration	m/s ²
Drivlina och mekanik		
ω_{hjul}	Hjulets vinkelhastighet	rad/s
ω_{motor}	Motorns vinkelhastighet	rad/s
R_{hjul}	Hjulets radie	m
T_{hjul}	Hjulets vridmoment	Nm
T_{motor}	Motorns vridmoment	Nm
P_{motor}	Effekten in i motorn	W
P_{batt}	Effekt till och från batteriet	W

Symbol	Beskrivning	Enhet
G	Motorväxelförhållande (utväxling)	-
Batterisystem och tillstånd		
SoC	State of Charge (laddningsnivå)	%
ΔSoC	Skillnaden mellan högsta och lägsta SoC-nivå	%
SoH	State of Health (batterihälsa)	%
FEC	Full Equivalent Cycles (motsvarande fulla cykler)	-
δ_{FEC}	Andel FEC per körning	-
V_{batt}	Batteriets terminalspänning	V
V_{oc}	Open Circuit Voltage (vilospänning)	V
V_{nom}	Nominell spänning	V
I_{batt}	Batteriström	A
Q_{tot}	Total laddningskapacitet	Ah
Q_{cell}	Laddningskapacitet för en enskild cell	Ah
E_{tot}	Batteriets totala energi	kWh
E_{min}	Energibehov per resa	kWh
E_{sp}	Batteriets energi per viktenhet	Wh/kg
m_{batt}	Batteriets massa	kg
C_{ladd}	C-rate vid laddning	1/h
C_{urladd}	C-rate vid urladdning	1/h
N_s	Antal celler i serie	-
N_p	Antal celler i parallell	-
Ekvivalent kretsmodell (Dual Polarization)		
R_{int}	Ohmsk inre resistans	Ω
R_1, R_2	Polarisationsresistanser	Ω
C_1, C_2	Polarisationskapacitanser	F
V_{RC1}, V_{RC2}	Transienta spänningsfall över RC-länkar	V
Degradering och miljö		
β	Basfaktor för degradering	-
k_T	Temperaturberoende stressfaktor	-
$k_{\Delta SoC}$	ΔSoC -beroende stressfaktor	-
$k_{C_{ladd}}$	Laddningsströmsberoende stressfaktor	-
$k_{C_{urladd}}$	Urladdningsströmsberoende stressfaktor	-
k_{mSoC}	Medel-SoC-beroende stressfaktor	-
$mSoC$	Batteriets genomsnittliga laddningsnivå	%
T_{batt}	Batteritemperatur	$^{\circ}C$
T_{ref}	Referenstemperatur för batteriåldring	K
ρ_{luft}	Luftdensitet	kg/m ³
P_{atm}	Lufttryck vid havsnivå	Pa

Innehåll

Beteckningar	ix
Notationer	xi
1 Inledning	1
1.1 Klimatmål och visioner	1
1.2 Hälsa- och miljöaspekter i stadsmiljö	2
1.3 Elbussar i Göteborg	2
1.4 Busslinje 64	2
1.5 Syfte	3
1.6 Mål	3
1.7 Avgränsningar	3
2 Teknisk bakgrund: Batteriteknik, fordonsdynamik och hållbarhet	5
2.1 Energiflöde, framdrivning och systempåverkan i en elektrisk buss . . .	5
2.1.1 Beräkningar för fordonsdynamik	6
2.2 Batteriteknik: Egenskaper och modellering	8
2.2.1 C-rate	8
2.2.2 FEC	8
2.2.3 Batterimodell	8
2.2.4 Laddningsnivå	9
2.2.5 Coulomb-räkning	10
2.2.6 Batterihälsa	10
2.2.7 Butterworth-lågpasfilter	12
2.3 Miljöpåverkan av tillverkning av och drift med batterier	12
2.3.1 Viktens påverkan på energiförbrukning	12
2.3.2 Batteridegradering och nyttjandegrad	13
2.4 Laddning av bussbatterier	13
2.4.1 Depåladdning	13
2.4.2 Ändstationsladdning	13
2.4.3 Laddning vid busshållplatserna	13
2.4.4 Laddning under färd	14
2.4.5 Infrastrukturen i Göteborg	14
2.5 Samhälleliga och etiska aspekter	15
3 Metod	17
3.1 Datainsamling	17

3.1.1	Marknadsöversikt elbussar	17
3.1.2	Tekniska specifikationer för infrastruktur och fordon	17
3.1.3	GPS-mätning	17
3.2	Kördata	18
3.2.1	Bussparametrar	18
3.2.2	Kördynamik	19
3.3	Simuleringsmodell	19
3.3.1	Drivlina	19
3.3.2	Laddning och stödlaster	20
3.3.3	Batteri	20
3.4	Definition av simuleringsfall och systemdimensionering	21
3.4.1	Fallbeskrivning	22
3.5	SoH-estimering	23
3.5.1	Miljöpåverkan från batteriproduktion och drift	24
3.5.2	Känslighetsanalys	24
4	Resultat	25
4.1	Körcykel	25
4.2	Olika scenarion för SoC-intervall	29
4.2.1	Fall 1	29
4.2.2	Fall 2	30
4.2.3	Fall 3	31
4.2.4	Fall 4	31
4.3	SoH-estimering	32
4.4	Klimatpåverkan från batteriproduktion och drift för fall 1-4	34
4.5	Känslighetsanalys	35
5	Diskussion	37
5.1	Teknisk analys av laddningsstrategier och deras inverkan på batterihälsa	37
5.2	Bussparametrarnas påverkan på dimensioneringen	38
5.3	Jämförelse med marknadens bussbatterier	39
5.4	Analys av klimatpåverkan	40
5.4.1	Driftsbetingad miljöpåverkan	40
5.4.2	Bytesfrekvensens klimatavtryck	40
5.4.3	Miljömässiga gränsvärden för hållbar batterikapacitet	41
5.5	Samhälle och etik	41
5.6	Förbättringar av batteridimensioneringen	42
6	Slutsats	43
	Litteraturförteckning	45
A	Parametrar för batteriets kretsmodell	I
B	Batterielektriska bussar på marknaden	V

1

Inledning

Vi människor står idag inför stora utmaningar när det gäller klimatet över hela planeten. Den primära anledningen till den stundande uppvärmningen är förbränningen av fossila bränslen. Fordon som drivs på dessa bränslen är den aspekt som statuerar det bästa exemplet för den påverkan som upplevs av folk i stadsmiljö [1]. Det här medför att ingenjörsmässiga lösningar krävs för att kunna hejda den globala uppvärmningen.

Omställningen har påbörjats i form av bland annat elektrifieringen av fordonsflottan världen över, inklusive i Göteborg. En viktig del av att minska klimatpåverkan i Göteborg är att få kollektivtrafiken, som körs näst intill dygnet runt i stora delar av staden, att drivas på el istället för fossila bränslen. I Göteborg är en stor del av kollektivtrafiken driven av stadsbussar, där Västtrafik är de som bedriver kollektivtrafiken där elektrifieringen redan kommit en bit på vägen. I Göteborg drivs utvecklingen dels av regionalpolitiska mål, dels av ambitionen att reducera buller, koldioxidutsläpp och partiklar [2].

1.1 Klimatmål och visioner

Som tidigare nämnt är den främsta drivande faktorn för elektrifieringen att nå klimatmål. Det här inbegriper främst de som sattes vid Parisavtalet 2015 i form av att alla ska bidra till att minska miljöpåverkan drastiskt år 2025-2045. Dessa mål brukar ofta kopplas till en utveckling av fordonsflottan världen över i form av att byta till miljövänliga bränslen i allmänhet och att driva fordon helt på el i synnerhet [3].

Sverige har stora visioner när det kommer till fossilfrihet. Att drastiskt minska användningen av fossila bränslen för att istället gå över till att driva fordon på el är en av visionerna. Inte minst gäller det transportfordon, där Sverige har som mål att minska växthusgasutsläppen med 70 % till år 2030 jämfört med 2010 [4]. Utöver de målen har Sverige en nollvision för transportutsläppen år 2045, vilket betyder att elektrifieringen behöver accelerera och att användningen av fossila bränslen behöver upphöra.

1.2 Hälsa- och miljöaspekter i stadsmiljö

Att elektrifiera kollektivtrafiken och minska utsläppen hjälper inte bara det globala klimatet, det medför även en mängd positiva följder för invånarna i stadsmiljöer. Att driva fordon i stadstrafiken på el leder till kraftigt reducerad ljudnivå, vilket är positivt för alla inblandade.

Vidare finns det en intressant aspekt som handlar om att förflytta de faktiska kvarstående utsläppen ut ur staden [5]. Utsläppen går inte till noll bara för att el används som energibärare. Detta eftersom framställningen av fordonet i allmänhet och batteriet i synnerhet påverkar miljön negativt. De utsläpp som kvarstår kan dock genom elektrifieringen flyttas bort från städerna, eftersom de istället sker där produktionen äger rum. Vilket bidrar då till mer renlig i luft inne i staden eftersom inga fossila bränslen förbränns lokalt.

1.3 Elbussar i Göteborg

En del av trafiken som står i fokus när det kommer till elektrifiering är bussar, främst i kollektivtrafiken. Det hela började med ett projekt vid namn ElectriCity [2]. Detta ämnade till att undersöka stadsbussar som går på el genom att studera möjligheten för att implementera nytänkande koncept för till exempel hållplatser och säkerhetsaspekter.

En central del i utvecklingen efter ElectriCity är Västtrafiks hållning till teknikval. Till skillnad från andra regioner, som valt en mer centralstyrd laddningsstrategi, tillämpar Västtrafik en teknikneutral inställning där bussoperatörerna själva får avgöra valet mellan depåladdning eller olika former av snabbaddning. Detta ställer höga krav på noggrann batteridimensionering, då valet av laddinfrastruktur direkt påverkar hur stort batteri bussen behöver bära för att klara sin dagliga drift utan att förkorta komponenternas livslängd.

1.4 Busslinje 64

Vid elektrifiering av tunga fordon styrs valet av batterikapacitet av en teknisk avvägning mellan energidensitet, fordonsdynamik och kemisk livslängd. För att reducera systemets miljöpåverkan krävs därför en förståelse för hur dessa parametrar korrelerar med miljöbelastningen ur ett livscykelerspektiv.

Dimensioneringen av ett batteri kommer i denna studie vara hänförd till busslinje 64 i Göteborg. Denna buss kör en sträcka mellan Högsbohöjd och Heden med 12 stopp däremellan [6]. Den drivs idag inte endast av elektriska motorer. Denna studie ämnar till att lägga en grund för att kunna ändra på detta. Denna busslinje inkluderar många korta stopp på låghastighetsvägar samt längre sträckor på huvudleder. Rutten har dessutom både upp- och nedförsbackar. Med tanke på detta anses denna linje ha en variation av olika typer av miljöer i körning, vilket gör den till en bra generell

rutt som kan ge en helhetsbedömning på hur en rutt för en buss ser ut i Göteborg.

1.5 Syfte

Syftet med projektet är att ta fram ett dimensioneringsunderlag för batteriet samt simulera effektförbrukningen i en elektrifierad stadsbuss på linje 64 i Göteborg. Batteriet skall uppfylla driftens energibehov under realistiska körförhållanden.

1.6 Mål

Huvudmålet är att ta reda på hur ett batteri ska dimensioneras för busslinje 64 i Göteborg.

1. Är marknadens elbussar idag anpassade (överdimensionerade/ underdimensionerade) för linje 64?
2. Hur bör en relevant beräkningsmodell för drivlinan formuleras och vilka modellparametrar är mest avgörande för resultatet?
3. Utifrån beräknat driftsfall, vilka faktorer är mest avgörande för dimensioneringen av bussens batteri och i vilken utsträckning påverkar de?
4. Hur beror batteriets livslängd på olika driftsförhållanden, såsom SOC-intervall, urladdningsdjup, energimängd och C-rate?
5. Hur stor blir batteriets miljöpåverkan under bussens livslängd, om batteriet är mindre och byts fler gånger jämfört med ett större batteri som byts färre gånger?

1.7 Avgränsningar

Undersökningen avgränsas till busslinje 64 för att säkerställa en högre validitet i den framtagna modellen. En generell bussmodell används vid simuleringen istället för en modellspecifik representation för att inte vara beroende av detaljerad, svåråtkomlig fordonsdata. Antaganden baserade på typiska parameterintervall bedöms ge tillräcklig noggrannhet för att ta fram en tillförlitlig modell inom projektets omfattning.

Datainsamlingen av verklig körprofil avgränsas till en mätresa med GPS. Att endast en körprofil registreras innebär en risk att viktiga variationer i driftförhållanden över bussens livslängd, eller över olika årstider, inte fångas upp. Däremot ger detta en mer rättvisande bild av den aktuella busslinjen än generella, standardiserade hastighetsprofiler för stadsbussar.

Etablerade studier och tillräckligt underlag som beskriver miljöpåverkan från elbussar och batterier på en nivå som bedöms ge tillräcklig bakgrund till arbetet finns. En fullständig livscykelanalys genomförs inte, då studiens huvudsakliga fokus ligger på

batteridimensionering och driftrelaterade krav. Batteriets hantering samt miljöpåverkan efter dess livslängd utesluts därmed också från studien.

Modellen använder laddning med konstant effekt genomgående. Alternativa laddningsstrategier, såsom konstant-ström/konstant-spänning hade rymts inom tillgänglig tidsram men uteslöts för att simplificera modellen.

Projektet avgränsas till Nickel-Mangan-Kobolt-kemi, vald utifrån dess egenskaper samt utbredning på den europeiska marknaden. Litiumjärnfosfat utgjorde ett möjligt alternativ men undersöktes inte inom ramen för projektet.

Utöver temperatur, kan även vind, väglag och nederbörd påverka energiförbrukningen genom förändrat luft- och rullmotstånd. Dessa effekter inkluderas dock inte explicit i modellen.

2

Teknisk bakgrund: Batteriteknik, fordonsdynamik och hållbarhet

2.1 Energiflöde, framdrivning och systempåverkan i en elektrisk buss

En elektrisk buss drivs genom ett sammanhängande energiflöde där elektrisk energi tillförs fordonet, lagras och därefter omvandlas till mekanisk rörelse. Genom en kedja av samverkande delsystem överförs energin stegvis och ger slutligen upphov till dragkraft i kontakten mellan däck och vägbana.

Utgångspunkten för energiflödet är elnätet, som utgör den externa energikällan vid laddning av fordonet. Den elektriska energin överförs därefter till bussen via en laddstation. Laddstationens uppgift är att säkerställa att överföringen av elektrisk energi sker på ett säkert och kontrollerat sätt så att fordonet kan laddas med rätt spänning och ström.

Den mottagna energin lagras därefter i bussens batteri, vilket utgör fordonets centrala energilager. Batteriet har en central funktion eftersom det förser drivsystemet med elektrisk energi under körning. Batteriets kapacitet och prestanda påverkar därmed både fordonets räckvidd och dess förmåga att leverera effekt vid olika driftförhållanden.

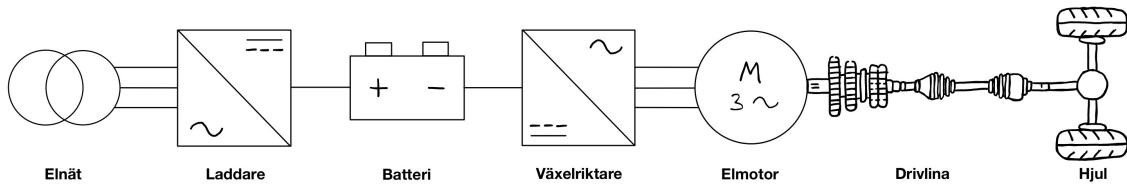
Mellan batteriet och elmotorn finns en växelriktare vars uppgift är att omvandla och styra den elektriska effekten. Växelriktaren reglerar energiflödet mellan batteriet och elmotorn så att motorn får de elektriska förutsättningar som krävs vid olika driftpunkter. Den har därmed en central roll för bussens acceleration, hastighet och verkningsgrad.

Den elektriska effekten omvandlas sedan i elmotorn till mekanisk effekt. Elmotorn genererar det vridmoment som krävs för att driva fordonet framåt. Till skillnad från en förbränningsmotor kan en elmotor leverera högt vridmoment redan vid låga varvtal, vilket gör den väl lämpad för tunga fordon i stadstrafik där många starter och stopp förekommer.

Från elmotorn förs den mekaniska effekten vidare genom bussens drivlina. Drivlinans uppgift är att överföra vridmomentet från motorn till hjulen. Hur drivlinan är utformad beror på vilken typ av drivsystem bussen har. Vid ett centralt drivsystem består drivlinan vanligtvis av en växelenhet, kardanaxel, differential, halvaxlar och nav. Vid en e-axel är växelenhet och differential istället integrerade i en gemensam enhet och vridmomentet överförs därefter vidare via halvaxlar och nav. Oavsett konstruktion är drivlinans funktion att anpassa och överföra det genererade vridmomentet på ett effektivt sätt till hjulen [7].

Slutligen är det hjulen som omvandlar vridmomentet till dragkraft i kontakten mellan däckens och vägbanan. Det är i denna kontaktpunkt som bussens framdrivning uppstår. Hur effektivt detta sker påverkas bland annat av däckens egenskaper, väggrepp och vägförhållanden.

Utöver det huvudsakliga energiflödet påverkas bussens energianvändning även av andra processer i systemet. Vid inbromsning kan en del av rörelseenergin återvinnas genom regenerativ bromsning och återförs som elektrisk energi till fordonets energilagrar. Samtidigt används elektrisk energi även till hjälpsystem såsom klimatanläggning, belysning och styrsystem. Därtill uppstår energiförluster i flera delar av systemet, bland annat i form av värme, elektriska omvandlingsförluster, friktion och luftmotstånd. Dessa kompletterande energiflöden har också betydelse för bussens totala energibehov och dess driftförhållanden.



Figur 2.1: Energiflöde i en elektrisk buss.

2.1.1 Beräkningar för fordonsdynamik

Till att börja med behöver man veta den totala kraften på hjulet F_{hjul} enligt

$$F_{hjul} = F_{luft} + F_{rull} + F_a + F_g \quad (2.1)$$

där F_{luft} är luftmotståndet, F_{rull} är rullmotståndet, F_a är accelerationskraften och F_g är lutningsmotståndet.

Där krafterna i summeringen kan beräknas enligt följande ekvationer.

- Luftmotstånd:

$$F_{luft} = 0.5 \cdot \rho_{luft} \cdot C_d \cdot A \cdot v^2 \quad (2.2)$$

där ρ_{luft} är luftdensiteten, C_d är luftmotståndskoefficienten, A är bussens frontalarea och v är bussens hastighet.

- Rullmotstånd:

$$F_{\text{rull}} = C_r \cdot m_{\text{tot}} \cdot g \cdot \cos(\alpha) \quad (2.3)$$

där C_r är rullmotståndskoefficienten, m_{tot} är bussens totala massa, g är tyngdaccelerationen och α är vägens lutning.

- Accelerationskraft:

$$F_a = \delta \cdot m_{\text{tot}} \cdot a \quad (2.4)$$

där δ är rotationsmassafaktorn och a är bussens acceleration.

- Lutningsmotstånd:

$$F_g = m_{\text{tot}} \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (2.5)$$

De mekaniska sambanden för hjulen och axeln beräknas enligt.

- Vinkelhastighet:

$$\omega_{\text{hjul}} = \frac{v}{R_{\text{hjul}}} \quad (2.6)$$

där ω_{hjul} är hjulets vinkelhastighet och R_{hjul} är hjulets radie.

- Vridmoment:

$$T_{\text{hjul}} = F_{\text{hjul}} \cdot R_{\text{hjul}} \quad (2.7)$$

där T_{hjul} är hjulets vridmoment.

Det mekaniska sambandet för vinkelhastigheten och vridmomentet före och efter en fixt växellådan.

- Vinkelhastighet:

$$\omega_{\text{motor}} = \omega_{\text{hjul}} \cdot G \quad (2.8)$$

där G är motorväxelförhållandet och ω_{motor} är motorns vinkelhastighet.

- Vridmoment:

$$T_{\text{motor}} = \frac{T_{\text{hjul}}}{G} \quad (2.9)$$

där T_{motor} är motorns vridmoment.

2.2 Batteriteknik: Egenskaper och modellering

För att driva elektriska fordon krävs energilagring. Det absolut vanligaste alternativet idag är litiumjonbatterier. Batterierna har blivit de mest populära tack vare deras långa livscykel, den höga energi- och effekttäthet samt en låg självurladdning [8]. De vanligaste typerna av dessa batterier globalt för elbussar är litium-nickel-mangan-koboltoxid (NMC) och litium-järn-fosfat (LFP). NMC-batterier brukas främst för den höga energidensiteten [9]. Denna batterityp är den vanligaste i USA och Europa. Kina använder däremot varianten LFP vilket är ungefär 30 % billigare per kilowatt-timme än NMC, dessutom har LFP har lägre brandrisk. Den högre energidensiteten hos NMC är mer fördelaktig för längre transportstrutter och kallare klimat, där LFP anses vara sämre i dessa kategorier [10].

För att på ett konkret sätt kunna dimensionera ett batteri för en buss behöver man titta på flera specifikationer som skall uppfyllas. Detta innebär att bestämma lämplig kapacitet samt effekt som batteriet ska leverera för att uppfylla driftsäkerhet. Det anses även intressant att studera hur laddningen av själva batteriet utförs [8].

2.2.1 C-rate

Ett viktigt begrepp inom batteridimensionering är capacity rate (C-rate) som är ett mått på hur snabbt ett batteri laddas eller urladdas förhållandevis till dess nominella kapacitet. En C-rate som har ett värde på 1C innebär att batteriet kan laddas upp/ur på en timme, enligt samma princip innebär 0,5C på två timmar respektive 2C på 0,5 timmar. För de flesta batterier i moderna elfordon är laddningshastigheten begränsad till omkring 1-1,5C. Nyare teknik och specifika fordon kan hantera högre effekter och där en maximal C-rate upp till 3C har identifierats som en övre gräns till uppladdningen [11, 12]. Urladdningen har som mest en C-rate på 5C [13].

2.2.2 FEC

Full Equivalent Cycles (FEC), eller motsvarande fulla cykler, är ett standardiserat mått som används för att kvantifiera den totala energimängd som har omsatts i ett batteri under dess drift. Eftersom batterier i praktisk användning, särskilt i stadsbussar sällan laddas ur helt från 100 % till 0 %, ger antalet fysiska laddningstillfällen inte en rättvisande bild av det faktiska slitaget. En FEC definieras som summan av urladdningar som tillsammans motsvarar batteriets totala nominella kapacitet. Det innebär exempelvis att om en buss kör en rutt som förbrukar 20 % av batteriets energi, krävs det fem sådana resor för att uppnå en FEC.

2.2.3 Batterimodell

Det finns flera föreslagna batterimodeller såsom elektrokemiska och ekvivalent kretsmodell (ECM). Li-jon batteriernas säkerhet och prestanda grundar sig i externa samt interna parametrar som exempelvis temperatur, åldring och självurladdning [14]. ECM metoden är vanlig på grund av de effektiva implementeringar samt att den är mindre beräkningskraftig. Men systemets beräkningar är inte alltid precisa. ECM

består av en spänningskälla, kapacitanser och resistanser som tillsammans simulerar batteriets karaktäristik. Den vanligaste typen av kretsscheman är första och andra ordningens Thevenin ekvivalenta schema. Fördelen med modellen är en relativt låg komplexitet, samt att den levererar acceptabel karaktäristik för li-jon batterier. Thevenin-schemat konstrueras med RC-kopplingar, där RC-koppling står för en resistans och en kapacitans parallellkopplade längs kretsen. Enligt Thevenin-modellen kan detta ge resultat som tar fram de parametrar ur kretsschemat med en osäkerhet på 7-10 % [14]. En relevant modell är Dual Polarization (DP) modellen som adderar en RC-koppling till Thevenin-modellen [15]. En studie indikerar att en jämförelse med Thevenin och DP-modellen vid olika temperaturer fastställer resultatet att Thevenin har en maximal osäkerhet på 2,8 %, medan DP-modellen visar en maximal osäkerhet på 1,09 % [15].

2.2.4 Laddningsnivå

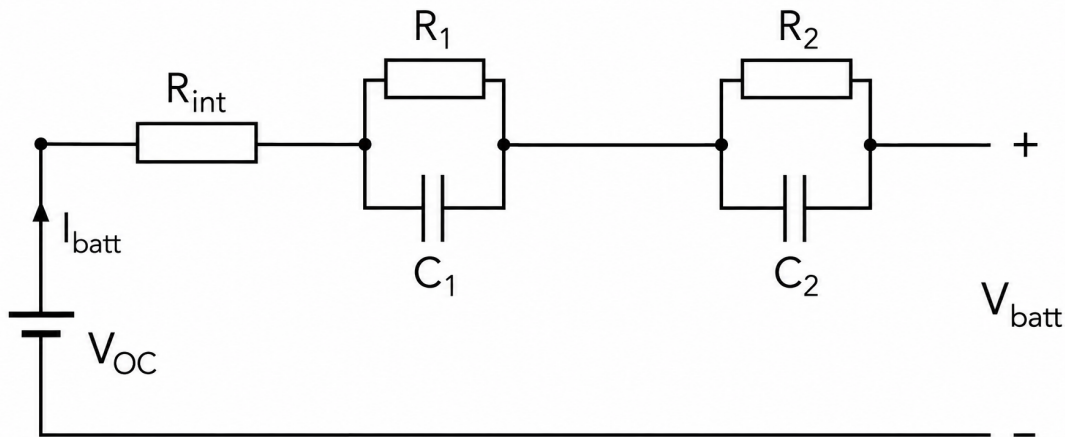
Laddningsnivå även kallat State of Charge (SoC) beskriver batteriets aktuella laddningsnivå i förhållande med dess kapacitet. SoC, som vanligtvis anges i procent, används för att bevaka batteriets energitillstånd [16].

I en daglig användning brukar man begränsa själva SoC till ett bestämt intervall. Det vill säga istället för att använda mellan 0 % till 100 % begränsar man intervallet mellan exempelvis 20 % och 80 % för att maximera livslängden och prestandan. Ett större SoC-intervall leder till ett batteri med mindre storlek, som kan leverera tillräckligt med energi vid ett behov. Däremot kan detta leda till kortare livslängd och därmed ge ökad miljökostnad samt ekonomisk kostnad [17]. Därför ligger det i intresse att kunna hitta en väl avvägd balans mellan energikapacitet och använt SoC-intervall. SoC-intervallet är relevant för batteriet. Batterier som cyklas eller förvaras i högre SoC-nivåer ger den snabbaste degraderingen av kapacitet, medan de lägre nivåerna har en betydligt mindre degradering [16].

För att kunna beräkna batteriets spänning behöver man dra bort spänningsfallet från vilospänningen V_{oc} enligt

$$V_{batt} = V_{oc}(\text{SoC}) - I_{batt} \cdot R_{int} - V_{RC1} - V_{RC2} \quad (2.10)$$

där R_{int} är det inre motståndet och I_{batt} är strömmen i batteriet. V_{RC1} och V_{RC2} beskriver spänningsfallet över de två parallellkopplingarna. En beskrivande bild till kretsschemat visas i Figur 2.2.



Figur 2.2: Ekvivalent kretsmodell för ett batteri (DP-modell).

2.2.5 Coulomb-räkning

Uppskattningen av SoC gör det möjligt att hantera batterisystemets prestanda och livslängd. Ett elektriskt fordon har sensorer för temperatur, spänning och ström men inte för SoC. För att kunna estimeras SoC i ett batteri så krävs algoritmer som analyserar data från olika sensorer. För att kunna utföra denna beräkning krävs något som kallas Coulomb-räkning vilket betyder att man integrerar strömmen med avseende på tiden. Formeln för denna metod ser ut som följande:

$$\text{SoC} = \text{SoC}(0) - \frac{1}{Q_{nom} \cdot 3600} \int I_{batt} dt \quad (2.11)$$

Där I_{batt} står för batteriets ström i Ampere och Q_{nom} står för den nominella laddningskapaciteten. [18].

2.2.6 Batterihälsa

Batterihälsa, även kallat State of Health (SoH), beskriver förhållandet mellan batteriets nuvarande och deras ursprungliga laddningskapacitet [19]. Genom att använda batteriets SoC tillsammans med batteriets hälsa kan man modellera batteriets livslängd [16]. Att uppskatta batterihälsan är även viktigt för att uppnå pålitliga förhållanden under drift för batterierna. Vilket leder till reducerade risker för själva batteriet och därigenom ökar kvaliteten för fordonen [19]. Ett viktigt begrepp vid analys av SoH är kalenderåldring vilket beskriver degraderingen av batteriets kapacitet och effekt när batteriet inte används [20]. Kalenderåldring kan variera med 1-4 % per år för NMC batterier [21]. Ännu ett viktigt begrepp är cykelåldring vilket beskriver hur batteriet åldras i förhållande till upp- och urladdning samt strömstyrka. Ett antal experiment som utförts i temperaturkammare vid rumstemperatur visar att en långsam batteriladdning vid slutet av uppladdningen är bättre för batterihäl-

san [22]. Dessutom ger högre strömnivåer en snabbare åldring av batteriet.

ΔSoC är betydande för SoH, genom att inte begränsa intervallet för batteriets upp- och urladdning kan ge ökad batterilivslängd. Genom variation av ΔSoC kan sträcka per laddning öka på ett förhållandevis enkelt sätt, däremot uppstår en kemisk process, vilket accelererar batteridegraderingen [23].

De lägre SoC-intervallet ger goda förutsättningar för förbättrad livstid. Genom att reducera SoC-nivån till under 50 % ökar fordonets batterilivslängd med 44-130 %. SoH påverkas inte endast av ΔSoC , utan även av cyklingen för ett visst SoC-intervall. Att cykla mindre ΔSoC vid genomsnittligt låg SoC är mer fördelaktigt för batteriets hälsa än att utföra samma process med hög SoC [16]. Vid laddning sker en kemisk reaktion mellan elektrolytvätskan och anoden i batteriet, vilket bildar ett lager som kallas för Solid Electrolyte Interface (SEI). SEI-lagret har en betydande roll för åldringen av litiumjonbatterier. När litiumjonbatterier utsätts för extrema förhållanden, exempelvis hög C-rate vilket gör SEI tjockare eller icke-skyddande, bidrar det till degradering genom flera processer [24]. Cykling vid 60-70 % SoC bidrar med tjockare SEI, större resistans på anoden samt förlust av katodmaterial än cykling på 10-20 % SoC. Genom att undvika höga SoC-värde visas god potential till att batteriets livstid [16].

Kalenderåldring visar ett starkt beroende på SoC-nivån, där högre SoC-nivå leder till större kapacitetsförlust. Därav minimeras kalenderåldringen då batteriet förvaras vid låg SoC-nivå. Att förvara batterier vid 50 % SoC gav signifikant lägre kalenderåldring än batterier förvarade vid 80 % och 100 % . Genom att begränsa tiden vid hög SoC och förvara batteriet vid 15 % SoC under vila, kan kalenderåldringen reduceras avsevärt [16]. Högre C-rate vid låga SoC-nivåer åldrade dessutom batteriet mindre än lägre C-rate vid höga SoC-nivåer [16]. Upprepade volymändringar orsakar cykliska mekaniska spänningar i elektroderna, vilket leder till strukturell degradering och materialskador. Detta försämrar batteriets prestanda och förkortar livslängden [25].

Att estimeras batteriets SoH är grundläggande för ett säkert och hållbart elektriskt fordon [26]. SoH kan mätas med flera parametrar, såsom utvärderingar grundade i kapacitet, effekt eller ohmisk intern resistans. Att applicera metoderna i praktiken för att beräkna SoH är svårt. För att på konkret sätt kunna estimeras SoH finns utvärderingsmetoder som delas upp i experimentella, datadrivna och modellbaserade tester, varav alla har sina för och nackdelar. De experimentella metoderna är de mest direkta för att få fram batteriparametrar, däremot lider de av långa testperioder och höga krav för hårdvara och experimentella miljöer. Den modellbaserade metoden utför simuleringar och tar fram matematiska modeller såsom (ECM) för att kunna uppskatta karakteristiken hos batterier. Däremot visar metoder såsom ECM ofta instabilitet på grund av osäkerheterna inom batterimodellen. Modellbaserade metoder har ett återkommande problem med att appliceras på batterier under driftförhållanden som härstammar från väldigt komplexa beräkningarna och svårigheten som kommer med att lösa dem. Förslaget till en god estimering för SoH är en sammansatt modell som kombinerar upp- och urladdningsdata för att estimeras SoH som

är grundad på insamlad data från fordon i drift [26].

2.2.7 Butterworth-lågpassfilter

Lågpassfilter används för att reducera högfrekvent brus med frekvenser större än brytfrekvensen, genom att dämpa snabba variationer. Ett Butterworth-lågpassfilter kännetecknas av en maximalt jämn amplitudrespons vid låga frekvenser och en monotont avtagande amplitudrespons vid höga frekvenser, vilket bevarar signalens långsamma variationer [27].

2.3 Miljöpåverkan av tillverkning av och drift med batterier

Processen för att tillverka litiumjonbatterier är resursintensiv och medför betydande miljöbelastning genom hela livsryckeln. Utvinningen av råmaterial genererar inte bara kraftiga mängder växthusgaser utan orsakar även vattenföroreningar, avskogning och förstörelse av ekosystem [28].

Enligt etablerad forskning utgör batteriproduktionen en betydande del av ett elfordons totala miljöpåverkan. Den initiala klimatbelastningen, ofta benämnd som koldioxidskulden, är direkt proportionell mot batteriets energikapacitet; produktionen av litiumjonbatterier genererar mellan 61 och 106 kg CO₂-ekvivalenter per kilowattimme (kWh) [29]. Denna miljöpåverkan härstammar främst från energiintensiva processer vid utvinning av råmaterial såsom litium, kobolt och nickel, vilket även medför lokal ekologisk skada [28].

I kontrast till denna initiala investering i koldioxid genererar driftsfasen en kontinuerlig men avsevärt lägre klimatbelastning per förbrukad energienhet. För den svenska elmixen uppgår utsläppen till 21,3 g CO₂e/kWh [30]. Detta innebär att fordonets totala miljöpåverkan styrs av en avvägning mellan den initiala koldioxidskulden vid produktion och den stigande belastningen från energiförbrukningen under fordonets nyttjandeperiod.

2.3.1 Viktens påverkan på energiförbrukning

Inom fordons elektronik och mekanik är fordonets massa en avgörande faktor för den specifika energikapaciteten. Batterisystemets specifika energi (E_{sp}) för stadsbussar ligger enligt studier i intervallet 150 – 220 Wh/kg [31]. Detta motsvarar en systemvikt på 4,5 – 6,7 kg per installerad kWh. Den totala batterimassan (m_{batt}), mätt i kilogram, kan därmed beräknas utifrån energikapaciteten (E_{tot}) genom följande samband:

$$m_{\text{batt}} = \frac{E_{\text{tot}}}{E_{\text{sp}}} \quad (2.12)$$

2.3.2 Batteridegradering och nyttjandegrad

Batteriets livslängd är beroende av dess användningsmönster, där urladdningsdjupet, ΔSoC , utgör en viktig parameter för batteriets hälsa. Sambandet mellan ΔSoC och antalet möjliga laddcykler är icke linjärt genom att frekventa djupa urladdningar påskyndar batteriets åldrande avsevärt jämfört med grundare cykler [32]. Genom att öka batterikapaciteten kan fordonets dagliga energibehov tillgodoses med ett lägre ΔSoC , vilket medför att batterisystemet arbetar inom ett mer gynnsamt område. Enligt [32] kan en sådan minskning av ΔSoC teoretiskt förlänga batterisystemets livslängd.

2.4 Laddning av bussbatterier

Teorin för laddning av tunga elfordon grundar sig i samspelet mellan fordonets batterikemi, laddningsinfrastruktur, effektkapacitet och energiöverföring. Till skillnad från elbilar kräver elbussar högre effekter och mer specifika laddningsmetoder. Laddningen kan ske antingen konduktivt genom kontakter till distributionsnätet eller induktivt. Laddningsinfrastrukturen för bussar varierar beroende på land och bussmodell. Generellt delas laddningsinfrastrukturen upp i fyra olika typer: depåladdning, ändstationsladdning, laddning vid busshållplatser och laddning under färd [33].

2.4.1 Depåladdning

Depåladdning är en infrastruktur som bygger på att elbussarna laddar under natten i ett bussgarage. Denna typ av infrastruktur passar elbussar med stora batterier som kan täcka en stor del av dygnets körsträcka utan att behöva ladda något extra. Då laddningen under natten sker under en längre tid anpassas laddströmmen för optimal hälsa på batteriet [33, 34].

2.4.2 Ändstationsladdning

Denna infrastruktur grundar sig i att elbussen kan ladda mer frekvent genom att kunna ladda efter varje körsträcka. Ändstationsladdning begränsar flexibiliteten för bussarna genom att laddstationerna måste vara utplacerade vid ändhållplatserna för varje rutt. Det krävs hög laddeffekt vid en hållplatsladdning då trafikoperatörer vill minimera tiden bussen står stilla [33, 34].

2.4.3 Laddning vid busshållplatserna

Laddning vid busshållplatserna kräver en storskalig och välutvecklad laddinfrastruktur där laddstationer finns på flertalet busshållplatser. Dock, genom korta laddnings-

tider med höga laddeffekter kommer elbussarna kunna laddas effektivt, men också väldigt frekvent [33, 34].

2.4.4 Laddning under färd

Laddning under färd tar bort behovet av extra uppehållstider vid laddstationer och är en teknik som kan realiseras genom takladdningar likt spårvagnar eller trådlöst genom induktiv överföring från marken [33, 34].

2.4.5 Infrastrukturen i Göteborg

Göteborg stad har genom sitt miljö- och klimatprogram 2021-2030 fastställt en tydlig strategi för att utveckla Göteborgs transportsystem mot ett mer elektrifierat system. Centralt i detta arbete är att minska transportsektorns miljö och hälsopåverkan genom en kombination av effektiv markanvändning och teknisk innovation, där en stor del är elektrifieringen av stadens transportmedel och utbyggnaden av laddinfrastruktur för stadens fordon [35].

Göteborgs laddinfrastruktur bygger på en kombination av både depåladdning och laddning vid ändhallplatser. Depåladdningsstationer är utspridda runt om i Göteborg och är inte direkt anslutna till flera busslinjer. De tenderar att befinna sig lite utanför innerstaden, bland annat vid Järnbrott [36]. Ändstationsladdningsplatserna är lokaliserade mer centralt och är därmed mer integrerade med befintliga bussrutten. En av Göteborgs största ändstationsladdningsplatser är placerad vid Heden [37].

2.4.5.1 Teknologin för depåladdning

Depåladdning i Göteborg sker till stor del genom ABBs allt-i-ett-laddare ur Terra-serien, specifikt genom modellerna Terra 124 och Terra 184 [38]. Terra 184 är designad för en maximal uteffekt på 180 kW, medan Terra 124 levererar upp till 120 kW [39]. Båda systemen tillämpar CCCV-reglering (*Constant Current Constant Voltage*). Den momentana laddeffekten $P(t)$ styrs av sambandet mellan laddspänningen $U(t)$ och laddströmmen $I(t)$ enligt

$$P(t) = U(t) \cdot I(t) \tag{2.13}$$

Vid låg laddningsnivå inleds processen i CC-fasen (*Constant Current*). Här levererar laddaren en konstant hög strömstyrka, upp till 400 A respektive 375 A. Under denna fas stiger batterispänningen $U(t)$ gradvis, vilket innebär att även effekten $P(t)$ ökar tills dess att systemets spänningsgräns nås. Laddaren kommunicerar kontinuerligt med bussens batteri- hanteringssystem (BMS) via protokollen ISO 15118 eller DIN 70121 [40].

När battericellerna når sin maximala spänningsgräns inom laddarens utspänningsintervall (150–920 V), beordrar BMS en övergång till CV-fasen (*Constant Voltage*). I detta skede hålls spänningen konstant ($U(t) = U_{max}$) medan strömmen $I(t)$ gradvis

sänks för att skydda battericellerna mot termisk degradering. Denna fas används för att ladda de sista 10–20 % av kapaciteten [40]. Båda modellerna stödjer dynamisk effektfördelning (*Dynamic Power Sharing*), vilket möjliggör samtidig laddning av två bussar där effekten fördelas till exempelvis 90+90 kW eller 60+60 kW [39, 38].

2.4.5.2 Teknologin för ändstationsladdning

Ändstationsladdning i Göteborg, även kallad *opportunity charging*, realiseras främst genom ABBs takladdningssystem HVC-PD (*Panto Down*) [41]. Till skillnad från depåladdarens manuella kabelanslutning bygger denna teknologi på en automatiserad pantograf som sänks ned från laddstolpen till bussen. Systemet är dimensionerat för effekter mellan 150 kW och 450 kW för att möjliggöra snabb energiöverföring under korta uppehåll på 3–6 minuter [41].

Precis som vid depåladdning tillämpas CCCV-teknologi, men med ett betydligt mer intensivt förlopp. Under CC-fasen levereras en extremt hög strömstyrka för att maximera energiöverföringen per tidsenhet. Kommunikation sker via protokollet *OppCharge*, som bygger på standarden ISO 15118, för att synkronisera BMS och laddaren innan pantografen sänks [40].

När spänningssgränsen nås, signalerar BMS att laddningen ska övergå till CV fasen, där strömmen $I(t)$ reduceras för att förhindra överhettning. Vid ändstationsladdning optimeras drifttiden genom att ofta avsluta laddningen innan CV-fasen blir för långvarig, då verkningsgraden och tidsvinsten per tillförd kWh sjunker när strömmen avtar [40].

2.5 Samhälleliga och etiska aspekter

Det finns flertal etiska frågor angående projektet. Huvudsakligen så är utvinningen av nyckelmetaller som litium och kobolt ett stort etiskt problem. Utvinningen av dessa metaller har miljöeffekter såsom utsläpp av växthusgaser, avskogning, mängder av vattenföroreningar och förstörelse av ekosystem. En stor del av gruvorna befinner sig i utvecklingsländer vilket kan innebära negativa sociala förhållanden relaterat till bland annat mänskliga rättigheter. Arbetarna kan utsättas för orättvisa löner samt farliga arbetsförhållanden vilket är kännetecknande för utnyttjande av arbetskraft i regionen [28].

Det finns betydelsefulla geopolitiska faktorer som spelar roll. Litiummarknaden växer kontinuerligt som resultat av den ständigt ökande efterfrågan på elfordon [42]. Uppskattningsvis befinner sig 75 % av jordens litiumreserver i Sydamerika, och resterande större reserver finns i Kina och Australien. Kina som 2015 skrev på Parisavtalet har som många andra gjort omställningar till klimatvänliga energikällor, vilket har ökat beroendet av litium [42]. Landet var år 2020 den femte största producenten av litium. Kinesiska företagen kontrollerar dessutom drygt 50 % av all litiumproduktion samt cirka 70% av den globala litiumjonbatteri-produktionen [42]. Både USA och EU har identifierat värdet i råvaran och har egna satsningar för att

konkurrera. Kinas dominans kombinerat med risken för brist på denna resurs kan ge upphov till framtida konflikter [42].

3

Metod

Detta projekt utfördes dels genom litteratursökning i olika databaser tillhandahållna genom Chalmers bibliotek. Dels utfördes en teknisk datainsamling med hjälp av GPS-mätning.

3.1 Datainsamling

Datainsamlingen genomfördes genom tre huvudsakliga spår för att täcka studiens litterära, tekniska och rutt-specifika behov. Vetenskapliga publikationer ligger till grund för den data som använts i den litterära delen av studien.

3.1.1 Marknadsöversikt elbussar

För att möjliggöra en teknisk jämförelse mellan utvalda 18 meter långa elektriska ledbussar sammanställs i Tabell B.1 centrala batteri, drivsystems, klimat och fordonparametrar för respektive modell. Urvalet av bussmärken har gjorts med utgångspunkt i en marknadsöversikt över ledande elbusstillverkare i Europa [43], medan de tekniska uppgifterna i tabellerna baseras på respektive tillverkares datablad och produktbroschyrer. Det bör dock noteras att tillverkarna redovisar tekniska data med varierande detaljeringsgrad, vilket innebär att vissa parametrar finns tillgängliga för vissa modeller men saknas för andra.

3.1.2 Tekniska specifikationer för infrastruktur och fordon

Specifikationer för den laddinfrastruktur som finns tillgänglig i Göteborg hämtades direkt från systemleverantörer och lokala aktörer. Tekniska data för depåladdare och pantograflösningar (HVC-PD) extraherades från ABB:s produktdatablad för att säkerställa realistiska laddkurvor i simuleringarna. Information om befintliga och planerade laddpunkter vid Heden och lokala depåer hämtades från rapporter av Västtrafik och Göteborgs Stad.

3.1.3 GPS-mätning

För att erhålla den körprofil som ligger till grund för studiens simuleringsmodell genomfördes empiriska mätningar direkt på busslinje 64. Mätutrustningen bestod

av en GPS-enhet av modell Garmin GPSmap 60CSx. Enheten hade en konfiguration med en samplingsfrekvens på 1 Hz, vilket därmed genererade tidsserie-data med en mätpunkt per sekund.

3.1.3.1 Genomförande av mätresa

Datainsamlingen utfördes den 18 februari 2026 under en sammanhängande tur- och returresa med start och mål vid Heden. Mätningen påbörjades klockan 11:46:22 och avslutades då bussen åter var på Heden vid 12:32:32. Under mätningen dokumenterades dessutom fordonets operativa beteende för att säkerställa att körprofilen representerade realistisk stadstrafik enligt avgränsningarna. Ett par noteringar var:

- Hållplatsbetjäning: Bussen trafikerade i sin helhet samtliga planerade hållplatser längs linjen. Bussen blev inte heller utsatt för oväntade händelser såsom blåljusutryckning, olycka eller ovanligt långa köer.
- Operativ avvikelser: Ett stopp vid Annedalskyrkan registrerades endast under färden i riktning mot Heden, medan hållplatsen passerades utan stopp i den motsatta riktningen.

Rådatan som därefter extraherades från GPS-enheten innehöll koordinater, tidsstämplar och altitud. Detta fördes sedan in i Matlab- och simuleringsmodellen beskrivet i nästa avsnitt.

3.2 Kördata

Detta avsnitt redovisar underlaget för simuleringarna utifrån samlad kördata mätt från bussen.

3.2.1 Bussparametrar

För att kunna ta fram ett batteri för bussarna på linje 64 behövde viktiga nyckelparametrar tas fram se 3.1. I modellen användes inte modellspecifika parametrar utan istället sammanställda dimensioner och parametrar se B.1. För att förenkla modellen gjordes vissa antaganden. Frontalarean för bussen förenklades till en perfekt rektangel, istället för rundade kanter som finns för att minska luftmotståndet. För att kompensera skillnaden användes en faktor på $0.95 \cdot A$. Utöver det förenklades även miljöfaktorerna temperatur och lufttryck till väl valda konstanter. I 3.1 redovisas fordons- och omgivningsparametrar samt miljöfaktorer för modelleringen.

Tabell 3.1: Fordons- och omgivningsparametrar.

Parameter	Värde
Fordonets parametrar	
m_{buss}	24 000 kg
h_{buss}	3,3 m
b_{buss}	2,5 m
A	8,25 m ²
C_d	0,6
C_r	0,012
δ	1,05
R_{hjul}	0,479 m
Omgivningsparametrar	
P_{atm}	101 325 Pa
ρ	$\approx 1,225 \text{ kg/m}^3$
g	9,82 m/s ²

3.2.2 Körddynamik

Utifrån koordinatresultaten från GPS-mätningarna beräknades bussfärdens hastighets- och höjdprofil i MATLAB med hjälp av trigonometriska samband. Både hastigheten och höjden filtrerades sedan med ett 4:e ordningens Butterworth-lågpassfilter med brytfrekvenserna 1/4 respektive 1/20. Bussens acceleration och vägens lutning beräknades därefter som förändring av hastigheten respektive höjden i förhållande till tiden. Ett tröskelvärde för körd sträcka mellan två mätpunkter sattes till 1,8 meter. Vid värden understigande denna tröskel sattes väglutningen till noll, för att reducera risken för numeriska fel vid korta avstånd. F_{luft} , F_{rull} , F_a och F_g beräknades utifrån parametrarna i Tabell 3.1 med hjälp av (2.2–2.5). De fyra krafterna summerades därefter enligt 2.1 för att ta fram F_{hjul} . Även w_{hjul} och T_{hjul} beräknades i MATLAB enligt (2.6, 2.7), för att därpå föras in i Simulink-modellen.

3.3 Simuleringsmodell

I detta avsnitt redovisas bussmodellen i Simulink. Bussen modellerades från hjul till batteri med en ekvivalent krets.

3.3.1 Drivlina

För simuleringen i Simulink användes en fix utväxling, där w_{motor} och T_{motor} beräknades utifrån 2.8 och 2.9. Modellblocket som användes för motorerna och växleriktarens verkningsgrad och maxprestanda är hämtad från [44]. Detta möjliggjorde modellering av motorernas dynamiska beteende utan egen implementering. I blocket beräknades motoreffekten P_{motor} baserat på insignalerna w_{motor} och T_{motor} , där även förluster i växelomriktaren och motorn beaktas. För att simulera förlusterna korrekt

skalades vridmomentet och vinkelhastigheten så att de ligger inom momentetskurvan.

3.3.2 Laddning och stödlaster

Ändstationsladdningen modellerades som en konstant effekt på 400 kW för laddningar mellan körningar, vilket approximativt representerar effektnivån för en pantografladdningsstation. Laddningar vid depåladdning sattes till 180 kW. Stödlaster approximerades till en konstant effekt på 10 kW. De tre effektbidragen från motorn, laddningen och stödlaster summerades till P_{batt} , där laddningen modellerades som en negativ effekt. P_{batt} skickades därefter som insignal till batteriet.

3.3.3 Batteri

Detta avsnitt fokuserar på att presentera dimensioner och egenskaper för de olika batterierna för de olika fallen. För modelleringen av de olika fallen sattes några parametervärden till konstanter se Tabell 3.2. Alltså, dessa parametrar kommer vara oberoende av de olika fallen.

Tabell 3.2: Batteripaketets gemensamma dimensioner

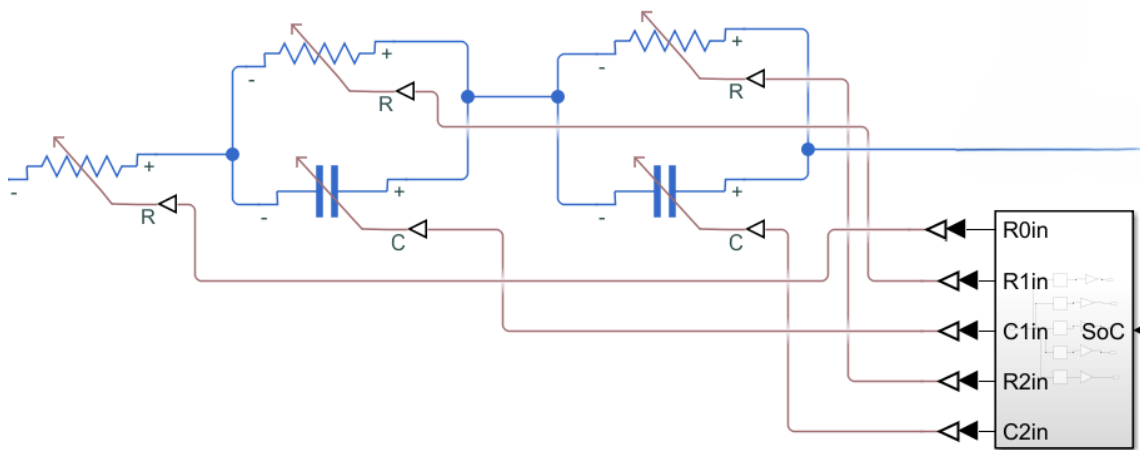
Parameter	Värde
$Q_{cell,tot}$	4 Ah
V_{oc}	Figur A.4
$V_{nom,cell}$	3,7 V
R_1, R_2	Figur A.3
C_1, C_2	Figur A.1
N_s	150

Valen av parametrar fastställdes genom en kombination av olika studier. Batteriets laddningskapacitet per cell sattes till 4 Ah. Det värdet stämmer överens med dagens NMC celler, där en förekommande kapacitet ligger mellan 3-5 Ah [45, 46]. Allmänt förekommande för NMC celler är att $V_{nom,cell}$ ligger mellan 3,6-3,8 V [14, 46]. Antalet seriekopplade celler togs fram enligt:

$$\frac{V_{oc,tot}}{V_{oc,cell}} = N_s \quad (3.1)$$

3.3.3.1 Ekvivalent kretsmodell

Vid modelleringen gjordes valet att använda DP-modellen. Modellen är bra lämpad för att simulera batteriers elektriska egenskaper. DP-modellen är en vidareutveckling på Theveninin-modellen med en ytterligare RC-länk. Modellen visar en lägre felmarginal och variation vilket gjorde att DP-modellen valdes för batteriet [15].



Figur 3.1: Krettschemat modellerat i Simulink.

3.3.3.2 Strömberäkning

Strömmen beräknas genom sambandet $P_{batt} = I_{batt} \cdot V_{batt}$ där V_{batt} togs fram genom att använda Simulink-blocket "voltage sensor" över kretsen.

3.3.3.3 SoC-beräkning

Batteriets spänning är beroende av SoC. Detta medför att SoC-beräkningen är beroende av sig själv. Genom att använda delay-blocket och 1D-lookup table-blocket kan man förskjuta spänningssignalen och få det önskade sambandet. SoC beräknades utifrån 2.11.

3.4 Definition av simuleringsfall och systemdimensionering

För att kunna dimensionera ett batteri för busslinje 64 utifrån de uppsatta målen har fyra olika fall konstruerats. Dessa fall ska ha som uppgift att visualisera och conceptualisera de olika tillvägagångssätten som finns vid dimensionering av bussbatterier och dess konsekvenser.

För alla fallen valdes en total bussflotta för linje 64 till totalt 6 bussar, vilket är det maximala antalet bussar som samtidigt trafikerar linjen. Därmed genomför varje enskild buss i genomsnitt 16 körningar (Heden till Fyrkörtorget och tillbaka) per dygn med 8–12 minuters uppehåll vid Heden mellan turerna [6].

Då målet för de tre första fallen var att klara en enda hel körning, behövdes det ett värde på använd energi E_{min} . Eftersom fallen använder olika ΔSoC och därmed har skiljande total energikapacitet, för att uppnå samma nominell energi, kommer massan på batteripaketerna variera. Batterimassan m_{batt} för de olika fallen beräknades enligt 2.12 där E_{sp} sattes till 200 Wh/kg. m_{tot} beräknades därefter genom summan

av m_{batt} och m_{buss} (24000 kg). Detta påverkade i sin tur E_{min} vid de olika fallen. Genom att integrera använd effekt över resans tid erhöles E_{min} och därmed totala laddningskapaciteten för batteriet enligt:

$$Q_{tot} \cdot N_s \cdot V_{nom,cell} = \frac{E_{min}}{\Delta SoC} \quad (3.2)$$

Antal celler i parallell N_p beräknades utifrån den efterfrågade totala energikapaciteten enligt följande:

$$\frac{Q_{tot}}{Q_{cell}} = N_p \quad (3.3)$$

Beräkningen av parallellkopplade strängar av seriekopplade celler gjordes för att kompensera den ökade polarisationskapacitansen inuti batteriet.

3.4.1 Fallbeskrivning

1. Detta scenario beskriver ett batteri som använder ett SoC-fönster mellan 10-90 %. Intervallet innehåller precis den energi E_{min} som krävs för att utföra ruten. Bussen har ett fönster på 8-12 minuter för att ladda batteriet med efter varje utförd rutt. I detta fall undersöktes konsekvensen av att använda ett litet batteri med stort SoC-fönster.
2. I detta fall, till skillnad från tidigare fall, användes ett mer vedertaget SoC intervall mellan 20-80 %. Likt tidigare fall ska även detta batteri klara en resa. Det här scenariot är det normalafallet. Även i detta fall har bussen 8-12 minuter för att ladda batteriet efter varje utförd rutt.
3. I det tredje fallet undersökes effekterna av att använda ett mycket smalt SoC-fönster mellan 10-30 %. Enligt [16] kan ett smalt SoC fönster vid låga laddningsnivåer ha en stor påverkan på livslängden av batteriet. Däremot kommer detta batteri vara markant större än de tidigare batterierna och därmed väga mer. Likt tidigare kommer detta batteri klara en resa med sitt givna SoC-intervall. Bussen har därefter 8-12 minuter för att ladda batteriet efter varje utförd körning.
4. I detta fall, till skillnad från de föregående fallen, användes endast depåladdning. Laddningen kommer att ske med depåladdning på natten, vilket medför att detta batteri behöver klara alla 16 resor per dag utan att ladda. Alltså kommer detta batteri vara större än industristandard. Syftet med detta fall är att undersöka skillnaderna med ett mycket stort batteri med ett mycket litet. Under natten har bussen minst 5 timmar på sig att ladda.

Fall 1-3 använder sig av ändstationsladdningen (400 kW) medans fall 4 laddar på natten med depåladdning (180 kW).

3.5 SoH-estimering

SoH degraderingen estimerades efter Olmos et al.:s modell, där de empiriskt presenterar degraderingen för NMC och LFP batterier baserad på flera publikationer med olika cell-tillverkare [47]. Olmos et al.:s modell utgår ifrån följande två ekvationer för att estimerar SoH i förhållande till full equivalent cycles (FEC) för ett NMC batteri

$$\delta' = \beta \cdot \exp \left(k_T \cdot \frac{T_{batt} - T_{ref}}{T_{batt}} + k_{\Delta SoC} \cdot \Delta SoC + k_{C_{ladd}} \cdot C_{ladd} + k_{C_{urladd}} \cdot C_{urladd} \right) \cdot \left(1 + k_{mSoC} \cdot mSoC \cdot \left(1 - \frac{mSoC}{2 \cdot mSoC_{ref}} \right) \right) \quad (3.4)$$

$$SoH = 100 - \delta' \cdot FEC^\alpha \quad (3.5)$$

där variablerna ΔSoC , C-rate och $mSoC$ bestämdes utifrån simuleringens batteri. Batteritemperaturen T_{batt} antas vara konstant på 25°C för samtliga fall. I estimeringen inkluderades även en kalenderådring på 2 % per år. För att estimerar SoH-degraderingen i förhållande till FEC användes (3.4) och (3.5) i MATLAB, med Olmos et al.:s framtagna fasta parametrar i Tabell 3.3.

Tabell 3.3: Variabler och Olmos et al.:s framtagna parametrar för deras degraderingsmodell för ett NMC-batteri [47].

Parametrar	Värde
β	0,0008365
k_T	21,6745
$k_{\Delta SoC}$	0,022
$k_{C_{ladd}}$	0,2553
$k_{C_{urladd}}$	0,1571
k_{mSoC}	-0,0212
α	0,915
T_{ref}	293 K
$mSoC_{ref}$	42%

Andel FEC per körning δ_{FEC} beräknas för varje fall enligt följande

$$\delta_{FEC} = \frac{\int I_{batt} dt}{Q_{tot} \cdot 2} \quad (3.6)$$

där Q_{tot} är den totala installerade laddningseffekten och integralen är den totala strömmen som lämnar batteriet under en resa. Därefter beräknades SoH som funktion av tid, baserat på antagandet att bussen kör i genomsnitt 16 turer per dygn.

3.5.1 Miljöpåverkan från batteriproduktion och drift

Produktionsutsläppen beräknades som batterikapaciteten för respektive fall multiplicerat med en utsläppningsfaktor för produktion av litiumjonbatterier. För att beakta osäkerheten i denna faktor beräknas produktionsutsläppen med ett intervall på 61–106 kg CO₂e/kWh, baserat på värden från 2.3. Därav kunde ett lägsta och högsta scenario beräknas för miljöproduktionen för respektive fall. Driftutsläppen beräknades utifrån en utsläppsfaktor för den svenska elmixen på 21,3 g CO₂e/kWh 2.3. Denna faktor multiplicerades med energiförbrukningen per körning för respektive fall, baserat på 16 körningar per dag under 365 dagar. Produktions och driftutsläppen sammanställdes sedan, varvid produktionsutsläppet adderades vid varje batteribyte. Resultatet illustrerades i två diagram i Matlab, ett som visar den totala miljöpåverkan över en 20-årsperiod, och ett som jämför produktions kontra driftutsläpp efter 20 år. En tidshorisont på 20 år valdes, då det ansågs utgöra en relevant tidsperiod för analysen.

3.5.2 Känslighetsanalys

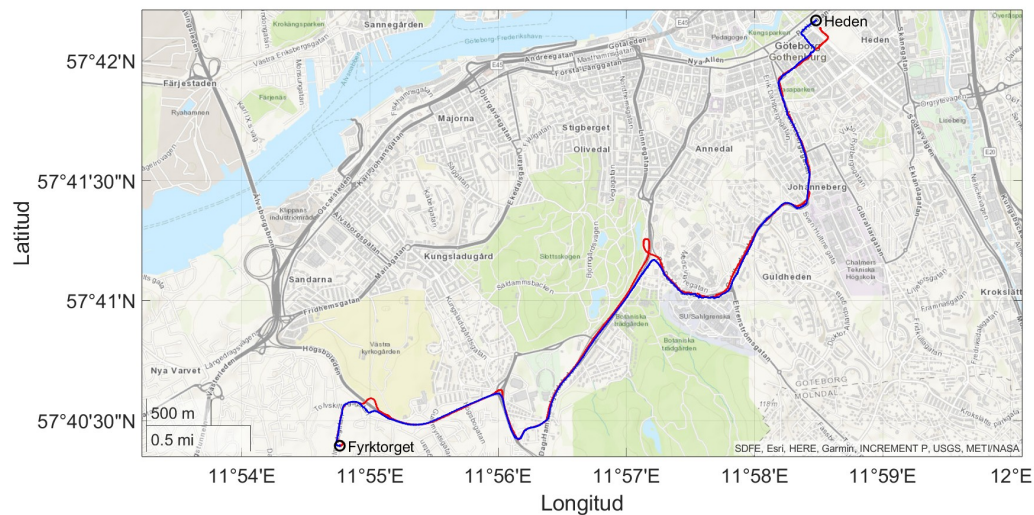
För att undersöka olika parametrars påverkan på modellen genomfördes känslighetsanalyser för SoC-, SoH-estimeringarna. Analyserna utfördes genom att öka en parameter i taget med 25 % för SoC-analys och 100 % för SoH-analys. För SoC-analysen undersöktes parametrarna batterikapacitet Q_{tot} , luftmotståndskoefficient C_d , rullmotståndskoefficient C_r , stödlasten samt bussens massa m_{tot} . Medans vid SoH-analysen varierades parametrarna batteritemperaturen T_{batt} , ΔSoC , mSoC, C_{ladd} och C_{urladd} . Båda känslighetsanalyserna jämfördes med fall 3 som grundmodell.

4

Resultat

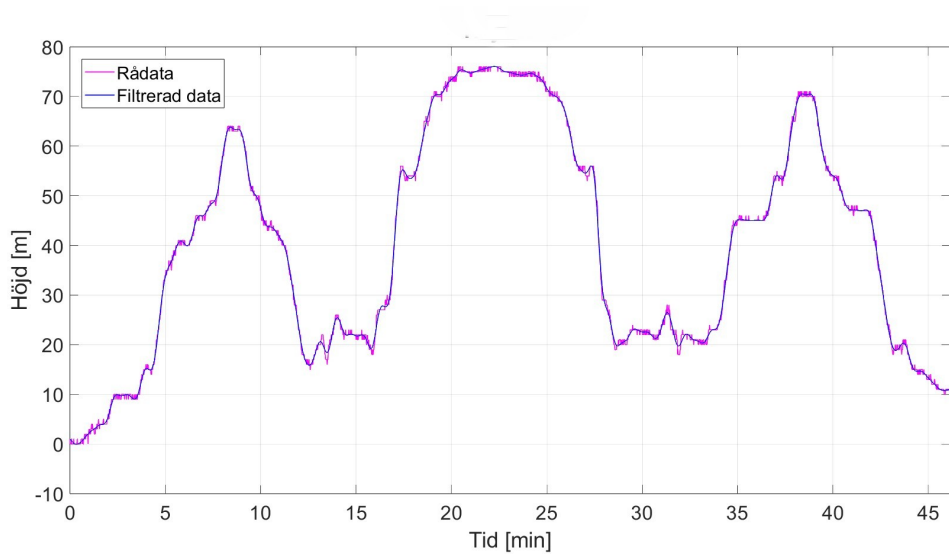
4.1 Körcykel

Körningen med GPS-mätning resulterade i en sträcka på 15,149 km. Bussens körrutt visas i Figur 4.1, där den röda linjen motsvarar den körda sträckan från Heden till Fyrktorget och vägen tillbaka representeras av den blåa.

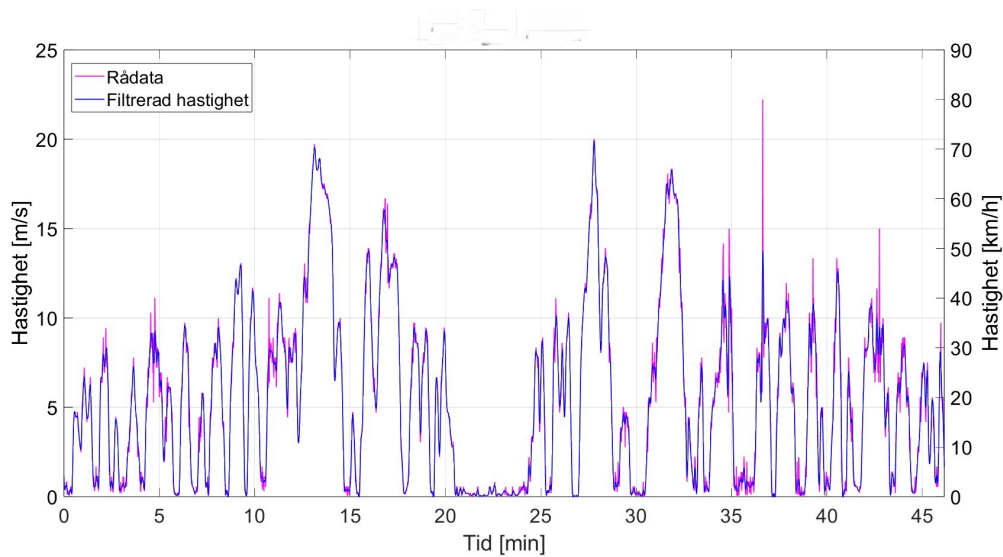


Figur 4.1: Körda sträckan med GPS-mätning. Röd linje representerar sträckan från Heden till Fyrktorget och blåa linjen är färden tillbaka.

Efter färden beräknades bussens höjd- och hastighetsprofil, tillsammans med tillhörande kurvanpassningar, vilket illustreras i Figur 4.2 respektive Figur 4.3.

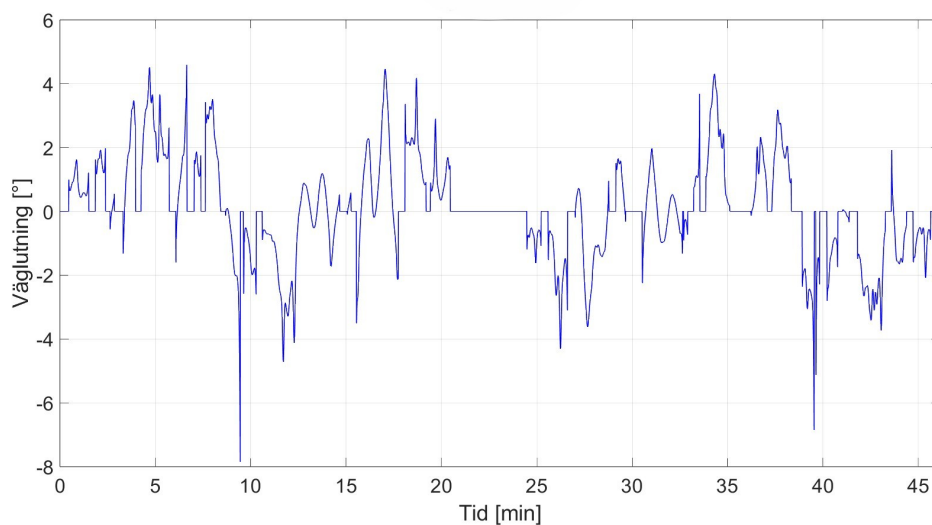


Figur 4.2: Bussens höjdprofil under en körning som rådata samt filtrerad data.

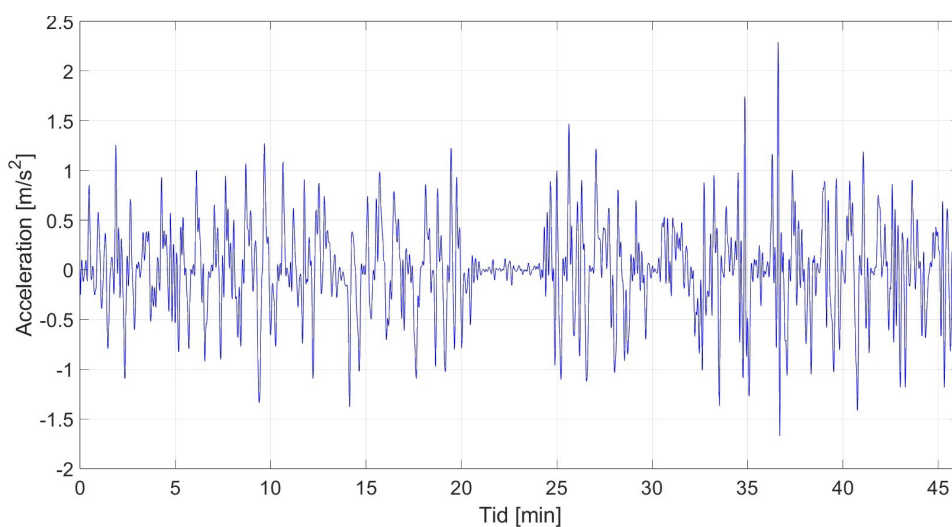


Figur 4.3: Busshastighet under en körning som rådata samt filtrerad data.

Höjd- och hastighetsdata användes därefter för att beräkna vägens lutning och bussens acceleration. Dessa körprofiler visas i Figur 4.4 och 4.5, där väglutningen försumrades om den körda sträckan mellan två mätpunkter understeg 1,8 meter.



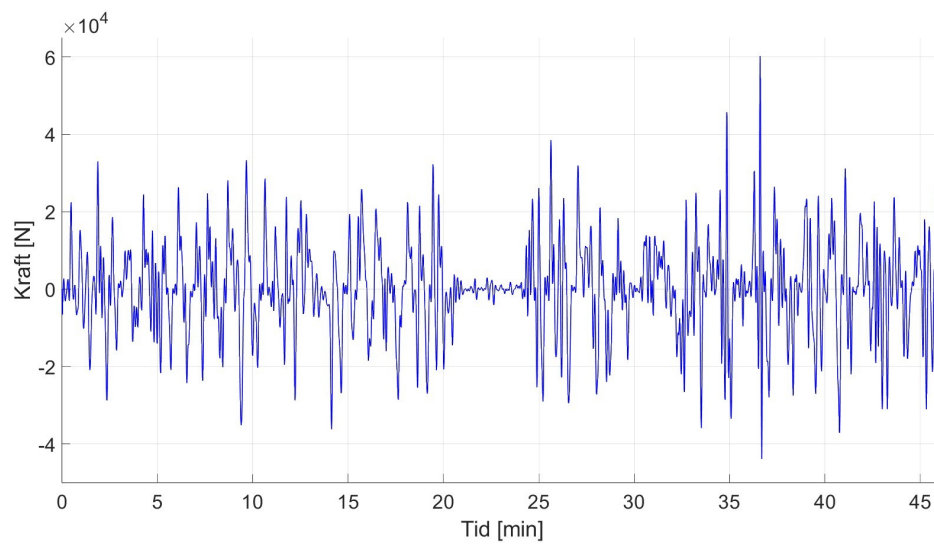
Figur 4.4: Resans väglutning, där väglutningen sattes till noll för mätpunkter med ett avstånd understigande 1,8 meter.



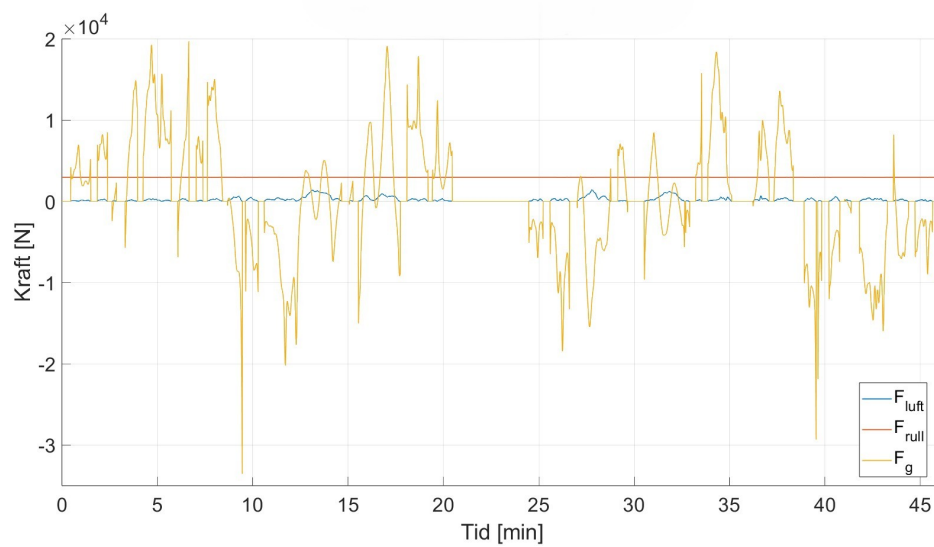
Figur 4.5: Bussens acceleration under en körning.

I Figur 4.6 och 4.7 illustreras de krafter som verkar på bussen samt den sammanlagd kraften F_{hjul} i Figur 4.8. Dessa krafter beräknades för en buss med totalmassa på 25 000 kg och kopplas därmed inte direkt till något av fallen 1 till 4. Därmed skiljer sig dessa krafter jämfört med de fyra scenarierna. Maximalt är F_{hjul} vid en tidpunkt 18 % större i fall 4 jämfört med Figur 2.1.

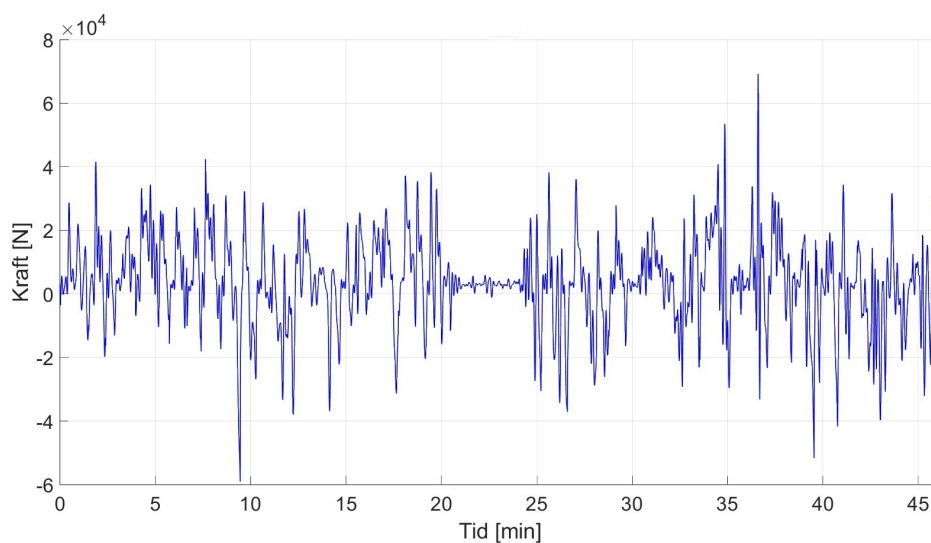
4. Resultat



Figur 4.6: Accelerationskraften F_a under en körning.



Figur 4.7: Rullmotståndet, luftmotstånd och lutningsmotståndet under en körning.



Figur 4.8: Den total kraften på hjulen F_{hjul} under en körning.

4.2 Olika scenarion för SoC-intervall

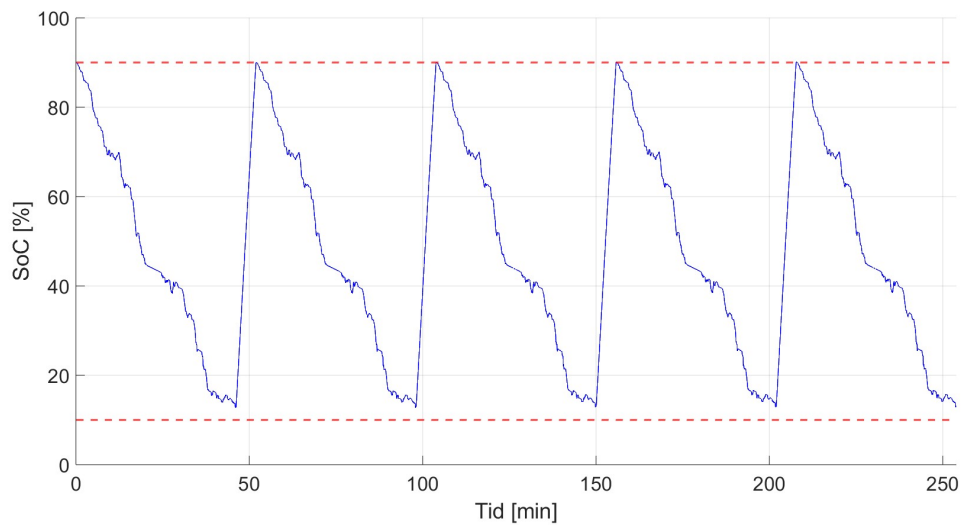
Nedan presenteras de resultat gällande SoC och batteridimensioner som togs fram genom simuleringen. Med hjälp av grafer i kombination med text illustreras skillnaden mellan de olika fallen introducerade i metoden. Batteridimensionerna utgår för samtliga fall från Tabell 4.1

Tabell 4.1: Batteripaketets nyckeldimensioner per fall.

Parameter	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4
Q_{tot}	84,2 Ah	111,7 Ah	343,9 Ah	2091,5 Ah
E_{min}	37,39 kWh	37,48 kWh	38,17 kWh	696,48 kWh
E_{tot}	46,7 kWh	62,5 kWh	190,9 kWh	1160,8 kWh
N_p	21	28	86	523
m_{tot}	24240 kg	24320 kg	24955 kg	29805 kg
Laddningseffekt	400 kW	400 kW	400 kW	180 kW

4.2.1 Fall 1

I det första scenariot används en hög ΔSoC på 80 %, där batteriet på 46,7 kWh opererar på SoC mellan 10-90 %. Bussen laddar fullt inom SoC-intervallet efter varje körning på 5,60 minuter. SoC-nivån under fem körningar samt laddningarna emellan redovisas i Figur 4.9.

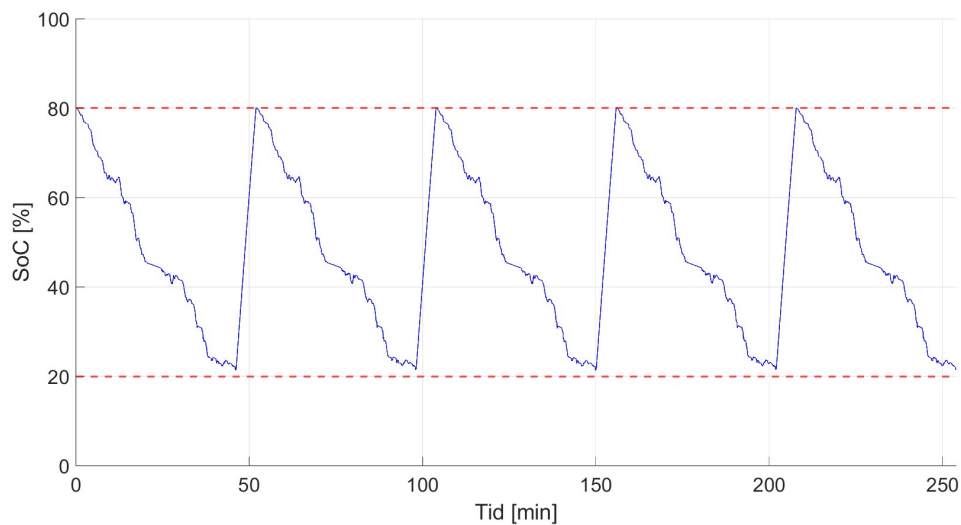


Figur 4.9: SoC för Fall 1 under fem körningar samt laddningar emellan.

Valet av 90 % som övre gräns motiveras dock av behovet att begränsa batteriets exponering för höga spänningsnivåer, vilket är kritiskt för att undvika accelererad kalenderåldring [16].

4.2.2 Fall 2

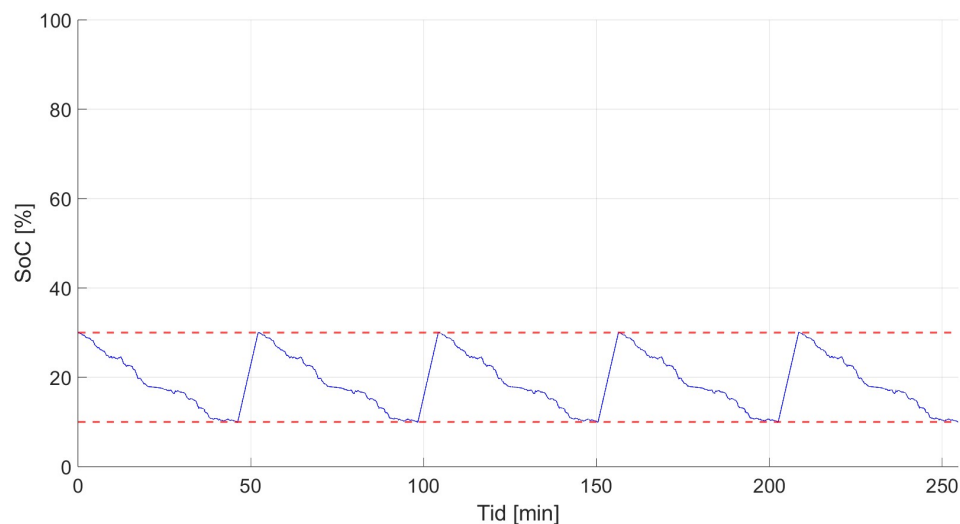
Detta scenario hänvisar till ett standard intervall som dagens batterisystemet ofta arbetar inom, med ett SoC-område mellan 20-80 %. I simuleringen laddar bussen efter varje körning under 5,62 minuter. SoC-nivån under fem körningar samt laddningarna emellan redovisas i Figur 4.10.



Figur 4.10: SoC för Fall 2 under fem urladdningar med laddning däremellan.

4.2.3 Fall 3

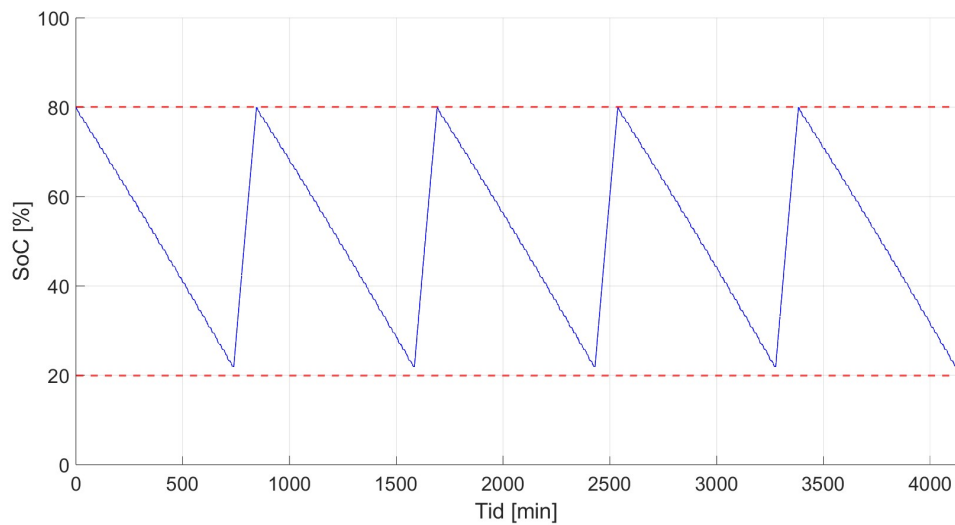
Det tredje scenariot utgår från en driftstrategi där mSoC inte centreras i mitten av SoC-intervallet. Fall 3 använder ett SoC-område mellan 10-30 %. Precis som fall 1 och 2 går hela urladdningen åt en körning och batteriet laddas därefter upp på 5,7 minuter. Under fem urladdningar och fyra laddning förändras SoC enligt Figur 4.11.



Figur 4.11: SoC för fall 3 under 5 urladdningar, med laddning mellan varje körning.

4.2.4 Fall 4

I fall 4 används samma SoC-intervall som för fall 2 i 4.2.2. Batteriet i detta scenario är, som tidigare nämnt större för att klara alla 16 körningar under dagen utan att ladda emellan. Laddningen sker istället på natten med depåladdning under cirka 3,9 timmar. Figur 4.12 redovisar SoC-resultatet under simulering under 5 urladdningar, vilket motsvara 80 körningar.



Figur 4.12: SoC för fall 4 under 5 urladdningar, med depåladdning var 16:de körning.

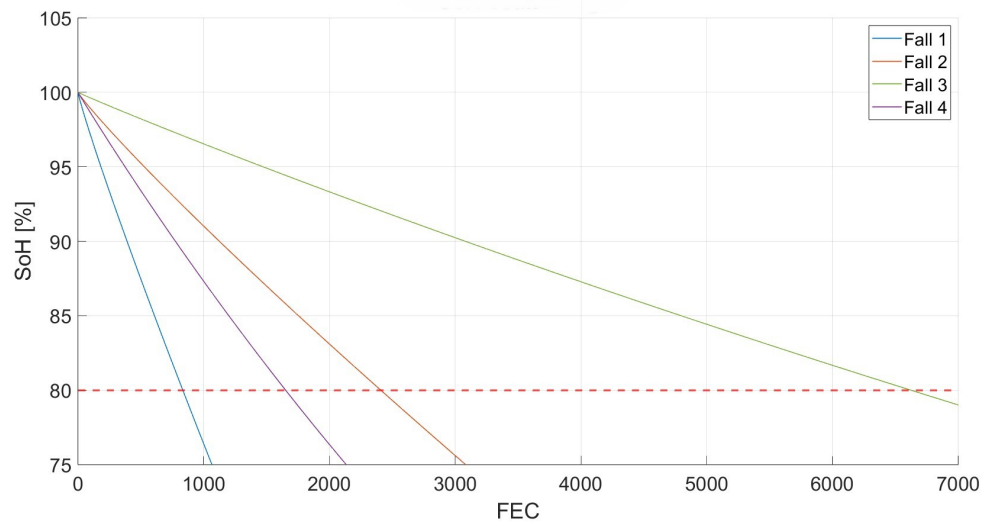
4.3 SoH-estimering

I följande avsnitt redovisas SoH-estimeringen för fall 1 till 4, där bussen åkar 16 varv per dygn. I Tabell 4.2 redovisas de olika batteriernas parametrar som används i beräkningen av SoH utifrån 3.4 och 3.5, där T_{batt} hålls konstant vid alla fallen på 25°C och kalenderåldringen är 2 % per år.

Tabell 4.2: Användningsspecifikationer för fall 1–4 med $T_{batt} = 25^{\circ}\text{C}$.

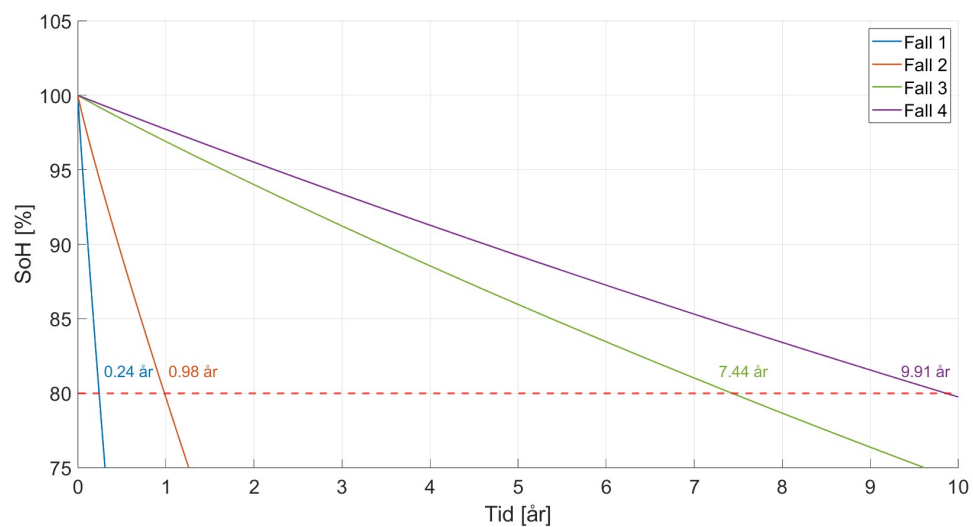
Variabler	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4
ΔSoC	80 %	60 %	20 %	60 %
C_{ladd}	8,56C	6,40C	2,1C	0,16C
C_{urladd}	1,02C	0,77C	0,25C	0,05C
$mSoC$	50 %	50 %	20 %	50 %
δ_{FEC}	0,592	0,449	0,153	0,028

Notera att δ_{FEC} redovisas för en körning, vilket i fall 4 representerar 1/16 av ΔSoC innan laddning. SoH-utvecklingen presenteras i Figur 4.13 som funktion av FEC, där batteriets livslängd anses vara förbrukad när SoH sjunker till 80 %.



Figur 4.13: Estimering av SoH som funktion av antal FEC.

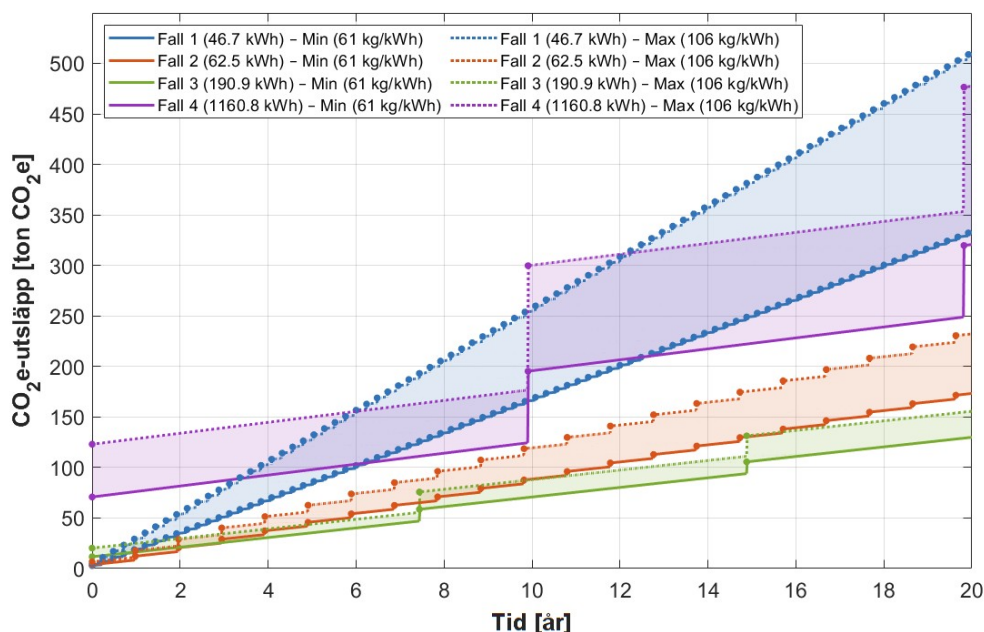
Med hjälp av δ_{FEC} från Tabell 4.2 kan SoH-estimeringen även illustreras som funktion av tid, vilket visas i Figur 4.14. Utifrån dessa resultat fastställs batterilivslängden, definierad som när SoH når 80 %, och skrivs ut i figuren.



Figur 4.14: Estimering av SoH som funktion av antal år.

4.4 Klimatpåverkan från batteriproduktion och drift för fall 1-4

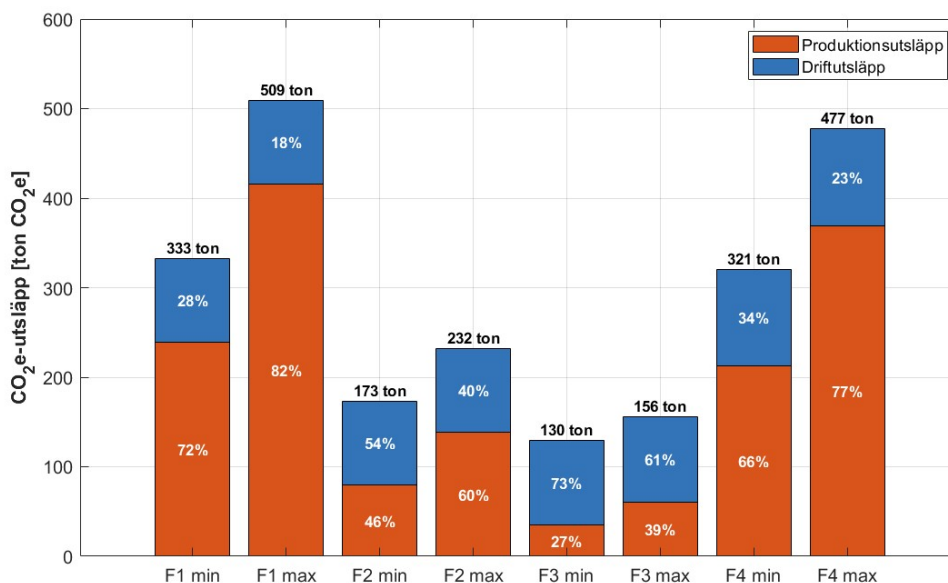
Figur 4.15 illustrerar klimatpåverkan uttryckt i CO₂e med en tidshorisont på 20 år för de fyra dimensioneringsfallen. Vid varje batteribyten, som visas i Figur 4.15 genom punkter, tillkommer ett produktionsutsläpp proportionellt mot batterikapaciteten. Detta syns genom ett vertikalt hopp i kurvorna, medan utsläppen mellan bytena ökar linjärt med driften för respektive fall.



Figur 4.15: Total klimatpåverkan i CO₂e för respektive fall över en 20-årsperiod, redovisade för ett minimi- och maximiscenario.

Fall 1 och 2, med kortast livslängd (0,24 respektive 0,98 år), genomgår flest batteribyten under simuleringsperioden vilket resulterar i form av en högfrekvent trappstegsformad kurva. Fall 3 och 4 har färre batteribyten och därav färre produktionsstillfällen, men ett markant högre utsläpp vid varje byte till följd av den större batterikapaciteten.

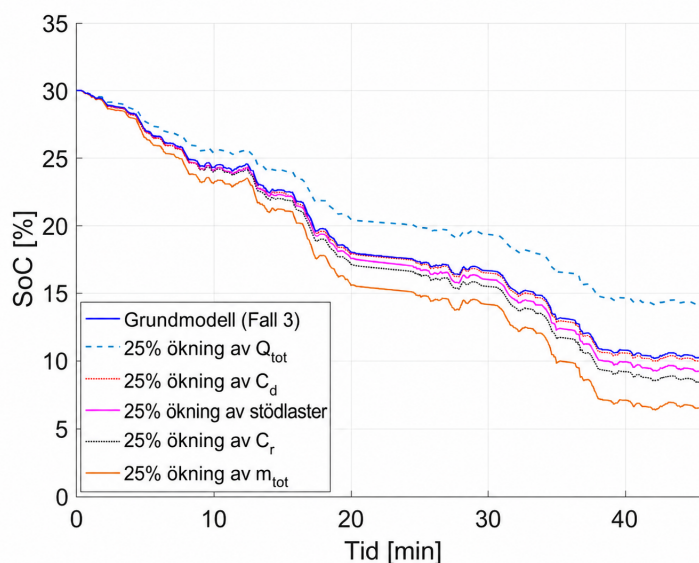
Figur 4.16 illustrerar fördelningen mellan produktions- och driftutsläpp för respektive fall efter 20 år. Fall 1 och 4 domineras av produktionsutsläpp där båda fallen har en hög andel produktionsutsläpp på 72–82 % respektive 66–77 % av det totala utsläppet. Fall 1:s produktionsutsläpp består av betydligt fler batteribyten i jämförelse med fall 4. Fall 2 och 3 har båda ett lägre totalt utsläpp än fall 1 och 4 och ett mer jämnt fördelat relation mellan produktionsutsläpp och driftutsläpp. Fall 3 utgör ett driftutsläpp som är större än produktionsutsläppet på 61–73 %.



Figur 4.16: Produktion kontra drift för respektive fall efter 20 år, redovisade för ett minimi- och maximiscenario.

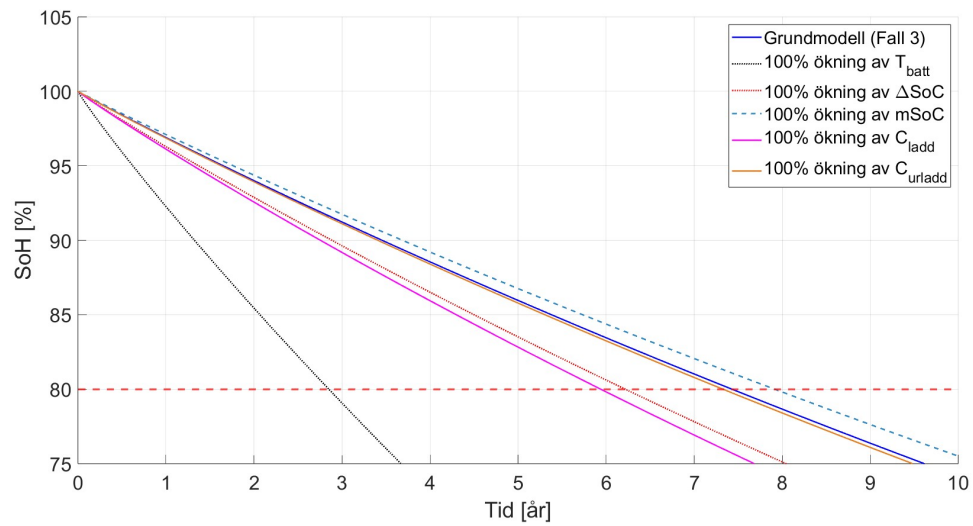
4.5 Känslighetsanalys

I följande avsnitt redovisas känslighetsanalyserna för SoC och SoH, där utgångsmodellen är fall 3 i båda analyserna. I Figur 4.17 illustreras skillnaderna för SoC-analysen mellan parametrarna batterikapacitet Q_{tot} , luftmotståndskoefficient C_d , rullmotståndskoefficient C_r , stödlasten samt bussens massa m_{tot} , vid ökning på 25 %.



Figur 4.17: Känslighetsanalys av SoC under en körning med fall 3 som referens.

I Figur 4.18 presenteras känslighetsanalysen för SoH, där en av parametrarna batteritemperaturen T_{batt} , ΔSoC , $m\text{SoC}$, C_{ladd} och C_{urladd} dubblas vid varje scenario.



Figur 4.18: Känslighetsanalys av SoH med fall 3 som referens.

5

Diskussion

För att identifiera den mest fördelaktiga balansen mellan batteriets livslängd, systemvikt och laddningsstrategi utvärderas fyra distinkta scenarier för SoC-fönster. Valet av utnyttjat SoC-intervall utgör en kritisk teknisk kompromiss i dimensioneringsprocessen. Ett brett fönster med hög nyttjandegrad reducerar behovet av installerad kapacitet och därmed fordonets totala massa, men samtidigt accelererar det batteriets kemiska degradering och förkortar dess livslängd. Genom att i simuleringen ställa olika nyttjandeintervall mot varandra kan de långsiktiga konsekvenserna för driften av busslinje 64 analyseras. Särskilt med avseende på det uppskattade antalet framtida batteribyten och den ökade energiförbrukning som följer av en högre systemvikt. Dessa scenarier möjliggjorde en kvantitativ utvärdering av hur valet av elektriskt arbetsområde påverkar fordonets totala miljöbelastning och operativa duglighet under realistiska körförhållanden. Resultaten visar hur de olika SoC-intervallen påverkar batteriets hälsa, där jämförande dessa emellan möjliggör valet av det optimala batteriet för busslinje 64.

5.1 Teknisk analys av laddningsstrategier och deras inverkan på batterihälsa

Det relativt aggressiva scenariot i fall 1 använder en hög ΔSoC på 80 % (mellan 10–90 % SoC), vilket lägger en tung belastning på batteriet. Utöver den rent mekaniska stressen vid djupa cykler, visar simuleringsparametrarna i Tabell 4.2 att batteriet i detta fall tvingas operera med en extremt hög laddningsström, där C_{ladd} uppgår till 8,56C. Detta är dock inte ett möjligt med dagens laddnings- och batteriinfrastruktur. Enligt Olmos et al.:s degraderingsmodell i 3.4 och 3.5 fungerar laddningshastigheten som en signifikant stressfaktor ($k_{C_{ladd}}$). Detta i kombination med att batteriet vistas i det övre spänningsfönstret (upp till 90 % SoC) accelererar den kemiska nedbrytningen i form av SEI därav ökar degraderingen av batterikapaciteten. Det höga intervallet bidrar dessutom till en ökad kalenderåldring vilket ger en större kapacitetsförlust. Detta bekräftas tydligt i Figur 4.13 och 4.14, där batteriets SoH når den kritiska gränsen på 80 % redan efter 3 månader. Resultatet understryker att en underdimensionering av kapaciteten ($E_{nom} = 46,7 \text{ kWh}$) leder till ett operativt ohållbart system där batteriet i princip behöver bytas ut kvartalsvis. Dessutom visar kravet på en mycket hög C-rate att detta fall inte går att

realisera.

Det andra scenariot, fall 2, visar en viss förbättring genom att minska fönstret till 20–80 % SoC, vilket reducerar ovannämnda problem i fall 1. Även om detta är en industristandard, visar resultaten en livslängd på endast 10-11 månader. Denna korta tid beror främst på att batteriet fortfarande är relativt litet (62,5 kWh), vilket, likt i fall 1, tvingar fram en hög laddcykel (6,40C) för att hinna återföra energin mellan turerna. Genom att analysera stressfaktorn k_{mSoC} i relation till de δ_{FEC} -värden som presenteras i Tabell 4.2, ser vi att kombinationen av hög strömstyrka och ett centrerat SoC-fönster skapar en synergieffekt som påskyndar resistansuppbyggnaden mer än väntat för denna specifika rutt. Även här krävs en C-rate som går över den högsta möjliga gränsen för batteriet på 3C.

Fall 3 representerar en mer sofistikerad optimeringsstrategi. Genom att öka den nominella kapaciteten till 190,9 kWh och begränsa SoC-fönstret till ett konservativt intervall (10–30 %), sänks ΔSoC till 20%. Enligt Olmos-modellen minskar stressfaktorn avsevärt när batteriet opererar vid lägre kemisk potential. Fördelarna med SoC-fönstret är enastående. Att cykla batteriet inom 10-30 % minimerar resistansökningen, kapacitetsdegraderingen, kalenderåldring och SEI avsevärt. Enligt tidigare nämnda faktorer och cykling inom SoC-fönstret med mindre ΔSoC bidrar till väsentligt ökad livslängd. Dessutom medför den högre kapaciteten att C_{ladd} sjunker till 2,10C och C_{urladd} till låga 0,25C (se Tabell 4.2). Resultaten i Figur 4.14 visar en livslängd på ca 7,4 år, vilket är en dramatisk förbättring. Detta fall uppfyller projektets mål att hitta en balans mellan systemvikt och livslängd, då det utnyttjar batteriets elektrokemiska stabilitetsområde utan att bära på den extrema massa som krävs i fall 4.

Det fjärde och sista fallet undersöker depåladdning med ett massivt batteri på 1160,8 kWh. Här ser vi den lägsta degraderingshastigheten med en livslängd på 9,86 år, främst tack vare att dess C-rate är låg (0,16C respektive 0,05C). Fall 4 behåller samma SoC-fönster som fall 2, vilket medför samma ovannämnda svårigheter batteriet präglas av inom området. Men om vi korrelerar detta till våra mål om resurseffektivitet, ser vi en avtagande nytta. Fall 4 kräver över sex gånger mer installerad kapacitet än Fall 3, men ger endast ca 33% längre livslängd. Ur ett elektrotekniskt perspektiv innebär den enorma massan dessutom att bussen ständigt arbetar mot ett högre rullmotstånd (F_{rull}), vilket ökar den totala energiförbrukningen per körd kilometer.

5.2 Bussparametrarnas påverkan på dimensioneringen

Utifrån det resultat som illustreras i Figur 4.17 är det möjligt att utvärdera hur starkt de valda batteriparametrarna faktiskt påverkar SoC under en körning. Detta ger möjligheten att diskutera möjliga optimeringar för batteridimensioneringen. Det visar sig att bara genom att ändra batteriparametrar med 25 % går det att notera betydande skillnader i utfallet av SoC över tid. Vid en ökning av Q_{tot} visar det sig

att SoC bibehåller ett högre värde under en längre tid jämfört med grundmodellen, vilket är ett rimligt resultat då batteriet vid detta fall får mer total energi att tillgå. Detta betyder att batteriet klarar sig längre under samma körsträcka och kurvan blir flackare. Om man analyserar påverkan av C_d , C_r och stödlaster, återigen med 25 %, är det tydligt att SoC istället är lägre än hos grundmodellen. Denna påverkan är dock inte lika markant som den från en ökning av m_{tot} . Påverkan från m_{tot} är avsevärd och ger tydligt en försämrade SoC-kurva. Sammanställt är det tydligt att det endast är grundmodellen samt det fall med en ökning av Q_{tot} som kvalificerar för busslinje 64. Detta är väntat enligt teorin och simuleringsmodellen eftersom de andra fallen innehåller en ökning av parametrar som ses som motstånd för batteriets drift.

När det kommer till känslighetsanalysen av SoH analyseras istället en ökning av specifika parametrar med 100 %. Med hjälp av Figur 4.18 är det möjligt att analysera hur parametrarna T_{batt} , ΔSoC , mSoC, C_{ladd} och C_{urladd} påverkar batteriets livslängd. Vid en ökning av mSoC håller SoH en högre nivå genom hela livslängden, vilket gör att batteriet inte når den kritiska gränsen på 80 % förrän efter ca 8 år, istället för 7,4 år med grundmodellen. Vid ökning av resterande parametrar visas dock en sämre livslängd, där T_{batt} noteras som den mest kritiska av dem. Om denna parameter ökas tappar batteriet mer än 4,5 år livstid jämfört med originalförhållandet, vilket betyder att detta är helt uteslutet från modellen. Den parameter som vid förändring endast ger en marginellt försämrade batteriprestanda är här C_{urladd} . Sammanfattningsvis är det alltså även här endast en parameter, mSoC, som ger en förbättrad prestanda för batteriet.

5.3 Jämförelse med marknadens bussbatterier

Marknadsöversikten B.1 visar att de undersökta eldrivna ledbussarnas batterikapaciteter ligger i storleksordningen 346 till 800 kWh. De simulerade fallen 1 till 3 i Tabell 4.1 som bygger på ändstationsladdning resulterar i batterikapaciteter mellan 46,7 och 190,9 kWh. Fall 4 i Tabell 4.1 bygger på ett depåladdningsscenario där bussen genomför 16 turer utan mellanliggande laddning vilket resulterar i en batterikapacitet på 1160,6 kWh. Därmed ligger fallen med ändstationsladdning under kapacitetsnivån för de undersökta marknadsbatterierna medan scenariot med depåladdning ligger över kapacitetsnivån för de undersökta marknadsbatterierna.

Marknadsöversikten och simuleringsmodellen ger olika typer av underlag. I modellen har batterikapacitet, C-rate, ΔSoc , δ_{FEC} , SoH-utveckling samt klimatpåverkan från drift kunnat beräknas för de fyra fallen. Dessa resultat är kopplade till körprofilen på linje 64 och till de antaganden som gjorts om laddningsstrategi och batterianvändning. Databladen för de undersökta marknadsbussarna ger däremot främst generella produktdata. Batterikapacitet och batterikemi finns redovisat för samtliga undersökta modeller medan exempelvis användbar energi och maximal laddningseffekt endast anges för vissa bussar. Parametrar som SoC intervall, faktiskt C-rate under drift, δ_{FEC} , SoH-utveckling och klimatpåverkan redovisas inte i databladen. Detta gör att batterikapacitet är den parameter som kan jämföras mest direkt mellan

marknadsbussarna och de dimensionerade fallen.

Utifrån denna kapacitetsjämförelse ligger fallen med ändstationsladdning under batterikapaciteterna för de undersökta marknadsbatterierna medan depåladdningsfallet ligger över dessa batterikapaciteter. Bedömningen av om marknads bussbatterier är anpassade för linje 64 beror därför på vald laddningsstrategi. Vid laddning efter varje tur är marknadsbatterierna kapacitetsmässigt större än det beräknade behovet medan de inte räcker till för ett scenario där bussen ska genomföra 16 turer utan mellanliggande laddning.

5.4 Analys av klimatpåverkan

Klimatprofilen för de fyra dimensioneringsfallen varierar beroende på batterikapacitet och livslängd. En central observation är ett val batteristorleken vilket leder till en direkt avvägning mellan ett större batteri som medför en högre produktionsutsläpp per cykel men som behövs bytas ut mer sällan, medan ett batteri med lägre kapacitet medför lägre produktionsutsläpp med kräver tätare byten över tid.

Av Figur 4.15 och 4.16 framgår tydligt att fall 2 och 3 uppvisar den lägsta totala klimatpåverkan över en 20-årsperiod, med slutvärden på 173–232 respektive 130–156 ton CO₂e. Fall 3 resulterar i det mest klimatfördelaktiga alternativet efter 20 år, men Figur 4.15 antyder att så inte är fallet över hela 20-årsperioden.

5.4.1 Driftsbetingad miljöpåverkan

En kritisk observation som Figur 4.15 tydligt visar är att fall 3 inte är det mest klimatfördelaktiga alternativet under de första åren. Vid tidpunkt noll kräver fall 3 en batterikapacitet på cirka 190,9 kWh, vilket är en produktion som är större än för både fall 1 och 2 som har en batterikapacitet på 46,7 kWh respektive 62,5 kWh. Detta resulterar i att fall 3 genererar ett omedelbart högre produktionsutsläpp. Under de inledande två åren uppvisar fall 2 en lägre klimatpåverkan än fall 3, varpå det senare blir det miljömässigt mest fördelaktiga alternativet. Detta är en kritisk aspekt vid valet av batteri, eftersom fall 3 kan visa sig vara ett sämre val ur klimatsynpunkt än vad 20-årsanalysen antyder om bussen tas ur drift tidigt, exempelvis till följd av en kollision, ett tekniskt haveri eller ett förändrat trafikuppdrag. Om bussen exempelvis havererar efter två år har fall 3 redan belastat klimatet med ett stort produktionsutsläpp, utan att livslängden har hunnit betala av sig genom många driftsår. I ett sådant scenario skulle fall 2 vara det alternativ som genererat ett lägre klimatavtryck och därmed vara det bästa valet.

5.4.2 Bytesfrekvensens klimatavtryck

Fall 1 visar tydligt hur en hög bytesfrekvens av batteriet ensamt kan driva upp den totala klimatpåverkan till nivåer som överstiger även fall 4 under delar av perioden. Givet den korta livslängden på endast 0,24 år genomgår bussen cirka 84 batteribyten under 20 år. Även fast varje enskilt batteribyte har ett relativt litet produktions-

utsläpp, ackumuleras dessa till ett stort slutvärde efter 20 år. Detta understryker att en kort livslängd är kostsam ur ett klimatperspektiv för denna buss, oavsett batteriets storlek.

5.4.3 Miljömässiga gränsvärden för hållbar batterikapacitet

Trots en livslängd på nästa 10 år genererar fall 4 ett oerhört stort totalt klimatavtryck, med 321–477 ton CO₂e. De kraftiga produktionsutsläppen vid varje batteribyte som sker 3 gånger på en 20-årsperiod visar att produktionsutsläppen per batteribyte är såpass höga att även en relativ lång livslängd inte räcker för att kompensera. Det innebär att det finns en övre gräns för hur stor batterikapacitet som är klimatomfattigt försvarbar, och fall 4 överskrider denna gräns.

5.5 Samhälle och etik

Projektets genomförande innebär inga fysiska risker för människor eller miljö utöver vardagliga trafikrisker. Då mätningar endast görs på bussens position påverkas förare, andra resenärer eller bussens normala trafik endast indirekt, men utsätts ej för risker eller intrång. Ett sannolikt utfalla av rapporten kan bidra till ökad kunskap inom dimensionering av batterier, vilket kan minska energiförbrukning och resursutgångar. I händelse av att data används utanför sitt sammanhang kan etiska problem uppstå om felaktiga slutsatser om kollektivtrafikens effektivitet dras. I det stora hela kan projekten bidra till en positiv samhällspåverkan genom att öka kunskapen kring eldriven stadsbusstrafik och dess potential att minska miljöpåverkan.

Det mest uppenbara samhällsproblemet för elbussar är själva produktionen av fordonet, mer specifikt batteriet. Produktionen av batteriet är präglad av mängder av problem, framför allt de extrema mängder koldioxidutsläpp som uppstår vid produktion. Utöver utsläppen uppstår faktorer som avskogning, betydande mängd vattenföroreningar samt förstörelse av ekosystem. Dessutom så uppstår de sociala faktorerna vilket består av de svåra arbetsförhållandena och tvivelaktiga lönerna som arbetarna utsätts för.

Att producera batterier till elbussarna bidrar säkerligen till att bilda en mer utsläppsfri kollektivtrafik, men det påverkar områden runt om jordklotet där både lokalt ekosystem och population utnyttjas.

Vid analys av ovannämnda fall utgör fall 1 och 4 de mest förödande resultaten. Mängden koldioxidutsläpp vid produktion är flera magnituder större än resterande fall, vilket ger insikt i hur mycket mer betydande mängd förstörelse av ekosystemet ökar i regionerna där resurserna för produktion utvinns. Ur ett socialt och etiskt perspektiv är fall 2 och 3 de mest uppenbara för att minimera skadan gjord på människa och samhälle, varav fall 3 ger absolut bäst förutsättningar.

5.6 Förbättringar av batteridimensioneringen

För vidare studier inom optimering av batteriet finns det olika möjliga aspekter att behandla. För att skapa en mer användbar modell när det kommer till generella fall för bussar hade fler körsträckor kunnat analyserats. Detta hade kunnat skapa en dimensionering av ett bussbatteri anpassat till flera olika busslinjer, och inte bara linje 64 i Göteborg.

För att kunna ge en mer verklighetstrogen bild av hur batteriparametrarna påverkar valet av batteridimensioneringen hade en kostnadsanalys varit gynnsam. Istället för att endast jämföra batteriernas miljöpåverkan är det också möjligt att utvärdera deras livskostnader. Detta hade gett en mer utförlig bild av hur dimensioneringen av batteriet spelar roll för utvecklingen av elektrifierad infrastruktur i Sverige.

Dessutom hade en analys av omhändertagandet av batteriet efter dess livslängd gett en bredare miljöaspekt. Med tanke på att det främsta målet med elektrifieringen av samhället är att ställa om till klimatsmarta val hade vidare utvärdering av detta varit fördelaktigt.

6

Slutsats

Baserat på den tekniska analysen i avsnitt 5.1 konkluderas att fall 3 utgör den mest optimala batteridimensioneringen för busslinje 64, då den balanserar systemvikt mot en hållbar livslängd. För att uppnå en fördelaktig livslängd på ca 7,4 år bör batteriet förhålla sig inom ett smalt SoC-intervall på 10–30 %, vilket sänker den kemiska potentialen och minimerar den genomsnittliga laddningsnivån till 20 %. Fall 3 undviker SoC-nivåer med skadligaste processerna för batteriets hälsa och livslängd. De mest fördelaktiga dimensionerna för att möta linjens energibehov innefattar en nominell kapacitet på 190,9 kWh, vilket medför att laddningshastigheten (C_{ladd}) kan begränsas till 2,10C och urladdningshastigheten (C_{urladd}) till 0,25C. Genom denna konfiguration reduceras den resistiva uppvärmningen och den kemiska nedbrytningen avsevärt jämfört med underdimensionerade alternativ, vilket gör strategin till det mest tekniskt försvarbara valet för den specifika rutten. Därefter vid analys av hur känsligt batteriets prestanda är sett till ökning av parametrar, konkluderas två viktiga delar. Det var tydligt att både SoC och SoH endast påverkades positivt av en parameter vardera, Q_{tot} respektive mSoC. Det noterades även att det var en parameter vardera som var särskilt känslig, m_{tot} respektive T_{batt} . Det kan alltså konkluderas utifrån detta att SoC och SoH förbättras för batteriet vid en ökning av Q_{tot} och mSoC. Detta kan tillämpas för att skapa en mer optimerad modell av batteriet för busslinje 64.

Klimatanalysen tyder på att det finns ett optimalt intervall för batterikapacitet och livslängd ur klimatsynpunkt. Både fall 2 och 3, med totala klimatutsläpp på 208 respektive 143 ton CO₂e, ligger nära detta intervall men av olika anledningar. Fall 2 är det mest fördelaktiga alternativet vid kortare drifhorisonter eller vid hög risk för förtida driftsavbrott, då de initiala produktionsutsläppen är lägre och klimatvinsten realiserar snabbare. Fall 3 är däremot betydligt bättre vid en full 20-årsperiod utan avbrott, genom kombinationen av en relativt lång livslängd och måttliga produktionsutsläpp per cykel. Givet att elbussar i normaltrafik anses ha en livslängd på tre år eller mer, och att ett haveri bör betraktas som ett undantagsscenario snarare än ett normalt planeringsantagande, är fall 3 med en batterikapacitet på 190,9 kWh det mest fördelaktiga dimensioneringsalternativet. Detta innebär att en balanserad kapacitet är att föredra för busslinje 64. Valet resulterar i en betydligt lägre klimatpåverkan än vid användning av dagens elbussar, vilket bekräftar att en optimerad elektrifiering är den mest hållbara vägen framåt.

Utifrån kapacitetsjämförelsen kan marknadens elbussar bedömas vara kapacitetsmässigt överdimensionerade för linje 64 vid ändstationsladdning eftersom de undersökta marknadsbussarnas batterikapaciteter överstiger de dimensionerade behoven i fall 1 till 3. För ett depåladdningsscenario där bussen ska genomföra 16 körningar utan mellanliggande laddning krävs däremot en batterikapacitet som är större än hos de undersökta marknadsbussarna. För detta scenario är marknadsbussarna därför kapacitetsmässigt underdimensionerade. Slutsatsen är därmed att marknadens elbussar främst är anpassade för linje 64 om någon form av mellanliggande laddning används.

Litteraturförteckning

- [1] T. D. Potapchenko, M. G. Gorodnichev, F. D. Potapchenko, och L. A. Fedotova, "Approaches to accounting for greenhouse gas emissions from vehicles in personal use," i *2023 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)*, 2023, s. 1–4.
- [2] A.-C. Lundström, M. N. Holmström, E. Torstensson, och M. Eriksson, "Elbussar i Sveriges kollektivtrafik – En kartläggning av Trafikförvaltningen Stockholm, Skånetrafiken och Västtrafik utifrån fyra perspektiv," Trafikverket, Solna, Sverige, Tekn. rapport TRV 2018/18530, Sep. 2019, hämtad: 2026-02-13. [Online]. Tillgänglig: <https://bransch.trafikverket.se/contentassets/19df180685ec467185af04e03f0cf03b/elbussar-version-190913.pdf>
- [3] N. Lutsey, "Global climate change mitigation potential from a transition to electric vehicles," The International Council on Clean Transportation, Tekn. rapport Working Paper 2015-5, Dec. 2015, hämtad: 2026-04-13. [Online]. Tillgänglig: https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/ICCT_ghg-reduction-potential-evs_201512.pdf
- [4] K. Holmgren, B. Hao Chen, C. Wickman, J. Hansson, E. Malmgren, M. Olsson, och M. Lundblad, "Transportrelaterade utsläpp av växthusgaser för godstransporter i sverige: nutid och scenarier under omställning för att nå klimatmål," 2025.
- [5] M. Aldenius, J. Khan, och A. Nikoleris, "Elektrifiering av stadsbussar: En genomgång av erfarenheter i sverige och europa," K2 - Nationellt kunskapscentrum för kollektivtrafik, Sverige, WorkingPaper, 2016.
- [6] Västtrafik, "Reseplanering," 2026, hämtad: 2026-02-13. [Online]. Tillgänglig: <https://www.vasttrafik.se/reseplanering/reseplaneraren/>
- [7] R. Hauser och A. G. Brown, "Electric transaxle with integral power generating device," Patent US11807296B1, 2023, hämtad: [2026-04-02]. [Online]. Tillgänglig: <https://patents.google.com/patent/US11807296B1/en>
- [8] Q. Lin, J. Wang, R. Xiong, W. Shen, och H. He, "Towards a smarter battery management system: A critical review on optimal charging methods of lithium

- ion batteries,” *Energy*, vol. 183, s. 220–234, 9 2019. [Online]. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544219312605>
- [9] P. Kumar, P. Mulukutla, och P. Doshi, “Real-world electric bus operation: Trend in technology, performance, degradation, and lifespan of batteries,” World Resources Institute India (WRI India), Working Paper, 2024. [Online]. Tillgänglig: <https://doi.org/10.46830/wriwp.22.00097>
- [10] International Energy Agency, “Global ev outlook 2025,” Rapport, International Energy Agency, 2025, hämtad 2026-02, Licence: CC BY 4.0. [Online]. Tillgänglig: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>
- [11] M. Jongerden och B. Haverkort, *Battery Modeling*, ser. CTIT Technical Report Series. Netherlands: University of Twente, Jan. 2008, nr TR-CTIT-08-01. [Online]. Tillgänglig: https://www.researchgate.net/publication/239851603_Battery_Modeling
- [12] A. Tomaszewska, Z. Chu, X. Feng, S. O’Kane, X. Liu, J. Chen, C. Ji, E. Endler, R. Li, L. Liu, Y. Li, S. Zheng, S. Vetterlein, M. Gao, J. Du, M. Parkes, M. Ouyang, M. Marinescu, G. Offer, och B. Wu, “Lithium-ion battery fast charging: A review,” *eTransportation*, vol. 1, s. 100011, 2019. [Online]. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590116819300116>
- [13] LG Energy Solution, *Cell Specification*, Dec. 2023, accessed: 2026-05-13. [Online]. Tillgänglig: https://www.lgmsol.com/assets/file/202312_LGES_cell_spec_en.pdf
- [14] G. Barletta, P. DiPrima, och D. Papurello, “Thévenin’s battery model parameter estimation based on Simulink,” *Energies*, vol. 15, nr 17, s. 6207, 2022. [Online]. Tillgänglig: <https://doi.org/10.3390/en15176207>
- [15] M. Tekin och M. İhsan Karamangil, “Comparative analysis of equivalent circuit battery models for electric vehicle battery management systems,” *Journal of Energy Storage*, vol. 86, s. 111327, 2024. [Online]. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X24009125>
- [16] E. Wikner och T. Thiringer, “Extending battery lifetime by avoiding high soc,” *Applied Sciences*, vol. 8, nr 10, 2018. [Online]. Tillgänglig: <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/10/1825>
- [17] N. R. Chowdhury, A. J. Smith, K. Frenander, A. Mikheenkova, R. W. Lindström, och T. Thiringer, “Influence of state of charge window on the degradation of tesla lithium-ion battery cells,” *Journal of Energy Storage*, vol. 76, s. 110001, 2024. [Online]. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X2303400X>
- [18] MathWorks, “Explore techniques to estimate battery state of charge,” 2024,

- hämtad: [2026-04-26]. [Online]. Tillgänglig: <https://se.mathworks.com/help/simscape-battery/ug/estimate-battery-soc-using-kalman-filter-example.html>
- [19] H. Ke, J. Bi, X. Zuo, Y. Wang, och J. Li, "State of health estimation for electric bus batteries: An improved long short-term memory network with attention and whale optimization," *Measurement*, vol. 257, s. 118689, 2026. [Online]. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224125020482>
- [20] P. Keil, S. F. Schuster, J. Wilhelm, J. Travi, A. Hauser, R. C. Karl, och A. Jossen, "Calendar aging of lithium-ion batteries," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 163, nr 9, s. A1872, jul 2016. [Online]. Tillgänglig: <https://doi.org/10.1149/2.0411609jes>
- [21] DNV, "2022 battery scorecard," 2022, accessed: 2026-05-13. [Online]. Tillgänglig: <https://www.dnv.com/publications/2022-battery-scorecard-228565/>
- [22] S. Barcellona och L. Piegari, "Effect of current on cycle aging of lithium ion batteries," *Journal of Energy Storage*, vol. 29, s. 101310, 6 2020. [Online]. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X19314574>
- [23] S. J. Park, Y. W. Song, B. S. Kang, W. J. Kim, Y. J. Choi, C. Kim, och Y. S. Hong, "Depth of discharge characteristics and control strategy to optimize electric vehicle battery life," *Journal of Energy Storage*, vol. 59, s. 106477, 3 2023. [Online]. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X22024665>
- [24] V. A. Agubra och J. W. Fergus, "The formation and stability of the solid electrolyte interface on the graphite anode," *Journal of Power Sources*, vol. 268, s. 153–162, 12 2014. [Online]. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775314008775>
- [25] D. Li, G. Zhu, H. Liu, och Y. Wang, "Diffusion-Induced Stress in Commercial Graphite Electrodes during Multiple Cycles Measured by an In Situ Method," *Micromachines*, vol. 13, nr 1, 1 2022. [Online]. Tillgänglig: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35056307/>https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35056307/?utm_source=chatgpt.com
- [26] M. Zhang, D. Yang, J. Du, H. Sun, L. Li, L. Wang, och K. Wang, "A Review of SOH Prediction of Li-Ion Batteries Based on Data-Driven Algorithms," *Energies 2023, Vol. 16, Page 3167*, vol. 16, nr 7, s. 3167, 3 2023. [Online]. Tillgänglig: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/7/3167/htm>
- [27] M. T. Thompson, "Chapter 14 - analog low-pass filters," i *Intuitive Analog Circuit Design (Second Edition)*, second edition uppl., M. T. Thompson, Red. Boston: Newnes, 2014, s. 531–583. [Online]. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124058668000140>

- [28] A. H. de la Iglesia, F. L. Alejano, A. J. L. Rivero, och D. H. de la Iglesia, “Ethics of Planned Obsolescence in Lithium Batteries: Environmental and Social Implications,” s. 271–279, 2023. [Online]. Tillgänglig: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-38344-1_26#chapter-info
- [29] E. Emilsson och L. Dahllöf, “Lithium-ion vehicle battery production: Status 2019 on energy use, co2 emissions, use of metals, products environmental footprint, and recycling,” IVL Swedish Environmental Research Institute, Stockholm, Report C 444, 2019. [Online]. Tillgänglig: <https://www.ivl.se/>
- [30] Electricity Maps. (2025) Sweden’s grid in review 2025. Electricity Maps. Analys av koldioxidintensitet och elproduktion i det svenska elnätet under 2025. [Online]. Tillgänglig: <https://www.electricitymaps.com/grid-in-review-2025/sweden>
- [31] Battery University. (2021) Bu-205: Types of lithium-ion. Cadex Electronics Inc. En genomgång av olika litiumjonkemier såsom NMC, LFP och NCA och deras specifika egenskaper. [Online]. Tillgänglig: <https://www.batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion/>
- [32] M. Ecker, N. Nieto, S. Käbitz, J. Scherb, J. Castaneda, I. Warnecke, och D. U. Sauer, “Calendar and cycle life study of li(nimnco)o₂-graphite cells,” *Journal of Power Sources*, vol. 248, s. 839–851, 2014.
- [33] Z. Yousaf, V. Hamidi, och N. Hansson, “Snabbladdning av elbussar i distributionsnät,” Energiforsk, Stockholm, Sverige, Tekn. rapport Energiforskrapport 2017:455, 2017. [Online]. Tillgänglig: <https://energiforsk.se/media/23481/snabbladdning-av-elbussar-i-distributionsnat-energiforskrapport-2017-455.pdf>
- [34] M. Lindgren, “Elektrifiering av stadsbussar: En studie av laddinfrastruktur och dess påverkan på elnätet,” Examensarbete, Uppsala universitet, Institutionen för teknikvetenskaper, Uppsala, Sverige, 2017. [Online]. Tillgänglig: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1159796/FULLTEXT01.pdf>
- [35] Göteborgs Stad, “Miljö- och klimatprogram 2021–2030,” Göteborgs Stad, Tekn. rapport, 2021, hämtad: 2026-03. [Online]. Tillgänglig: https://goteborg.se/wps/PA_Pabolagshandlingar/file?id=55576
- [36] Västtrafik, “Ny depå för elbussar invigd i göteborg,” Pressmeddelande via TT, dec 2020, hämtad: 2026-03. [Online]. Tillgänglig: <https://via.tt.se/pressmeddelande/4018731/ny-depa-for-elbussar-invigd-i-goteborg?publisherId=3072694&lang=sv>
- [37] Sveriges Lokala Utvecklingskultur (SLUK), “Heden – en central punkt för laddinfrastruktur,” Webb sida, 2024, hämtad: 2026-03. [Online]. Tillgänglig: <https://www.sluk.se/sluk.se/heden/>
- [38] ABB, “Smart depåladdning från ABB för Göteborgs nya elbussar,” Pressmeddelande, Nov. 2021. [Online]. Tillgänglig: <https://new.abb.com/news/>

sv/detail/84780/smart-depaladdning-fran-abb-for-goteborgs-nya-elbussar

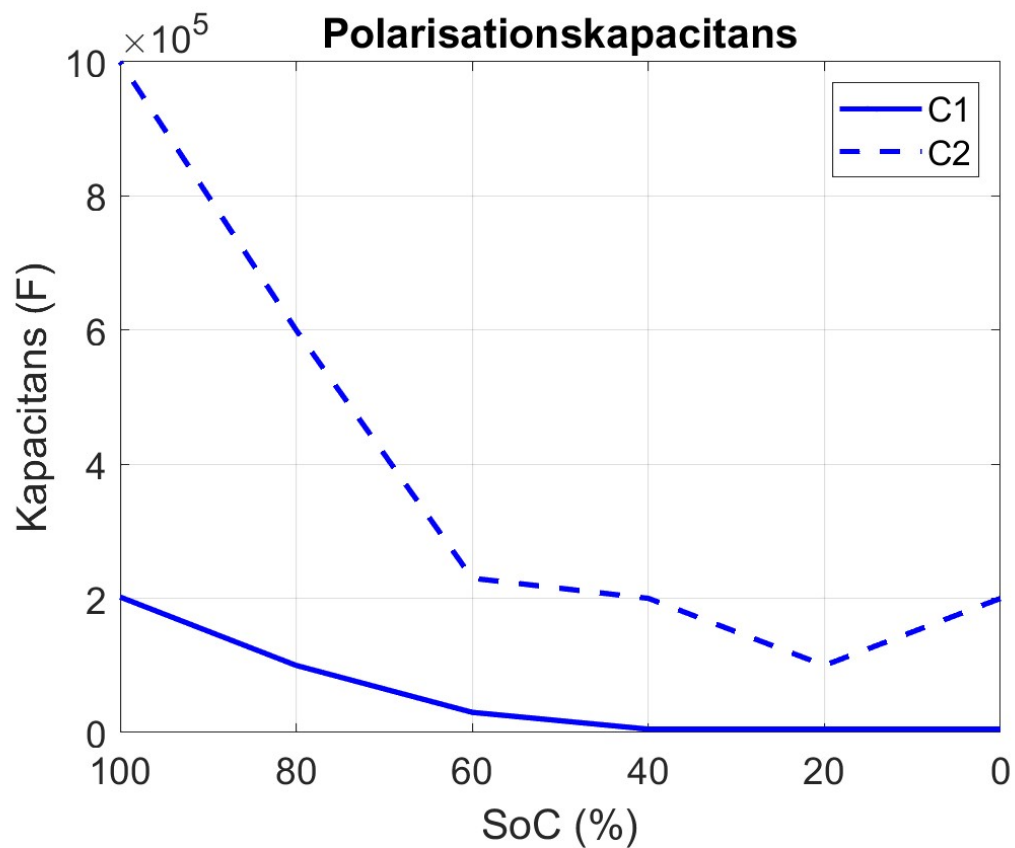
- [39] ABB E-mobility, “Product data sheet terra T124 | T184/v1-1,” ABB E-mobility B.V., Delft, Netherlands, Tekn. rapport, 2024, all-in-One Charging at a Small Footprint. [Online]. Tillgänglig: <https://e-mobility.abb.com/T184>
- [40] X. Zuo, J. Bi, H. Ke, Y. Wang, och J. Li, “Enhanced battery state of health estimation for electric buses using whale optimization and attention-based LSTM network,” *Scientific Reports*, vol. 15, nr 3675, s. 1–18, 2025. [Online]. Tillgänglig: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-04116-y>
- [41] ABB, “Pantograf ned för elbussar,” Produktbeskrivning, 2024, laddningslösning baserad på OppCharge-gränssnittet för automatisk snabbbladdning. [Online]. Tillgänglig: <https://new.abb.com/ev-charging/sv/pantograf-ned>
- [42] S. O. Altiparmak, “China and Lithium Geopolitics in a Changing Global Market,” *Chinese Political Science Review 2022 8:3*, vol. 8, nr 3, s. 487–506, 8 2022. [Online]. Tillgänglig: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41111-022-00227-3>
- [43] E. staff, “European electric bus market in 2025,” 2025. [Online]. Tillgänglig: <https://www.sustainable-bus.com/news/electric-bus-market-europe-2025/>
- [44] M. Khalid, “QSS Toolbox,” 2019. [Online]. Tillgänglig: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/73483-qss-toolbox>
- [45] H. Zhang, F. Altaf, och T. Wik, “Synthetic dataset of LG M50 batteries with different degradation pathways,” *Data in Brief*, vol. 57, s. 111076, 2024. [Online]. Tillgänglig: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.111076>
- [46] J. Estaller, A. Kersten, M. Kuder, T. Thiringer, R. Eckerle, och T. Weyh, “Overview of battery impedance modeling including detailed state-of-the-art cylindrical 18650 lithium-ion battery cell comparisons,” *Energies*, vol. 15, nr 3822, 2022. [Online]. Tillgänglig: <https://doi.org/10.3390/en15103822>
- [47] J. Olmos, I. Gandiaga, A. S. de Ibarra, X. Larrea, T. Nieva, och I. Aizpuru, “Modelling the cycling degradation of li-ion batteries: Chemistry influenced stress factors,” *Journal of Energy Storage*, vol. 40, s. 102765, 2021. [Online]. Tillgänglig: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X21004904>
- [48] Yutong, “Yutong u18 | 18m electric articulated bus | high-capacity brt solution,” 2025. [Online]. Tillgänglig: <https://en.yutong.com/products/U18.shtml>
- [49] MAN, “Man lion’s city technical data.” [Online]. Tillgänglig: https://www.man.eu/global/en/bus/the-man-lion_s-city/technology-and-specification/all-models-and-specifications.html

- [50] Mercedes-Benz, “The ecitaro. technical data and equipment at a glance.” Germany, 2026. [Online]. Tillgänglig: <https://www.mercedes-benz-bus.com/int/en/models/ecitaro/facts-ecitaro.pdf>
- [51] I. BUS, “E-way,” 2024. [Online]. Tillgänglig: https://www.ivecobus.com/worldwide/-/media/IvecoBus/International/Brochures/2025/2025_03_E-WAY_EN.pdf
- [52] Solaris, “Solaris urbino 18 electric,” Polen, 2024. [Online]. Tillgänglig: https://www.solarisbus.com/public/assets/content/pojazdy/2024/Solaris_Urbiono_18_electric_omnibusspiegel.pdf
- [53] V. Buses, “Volvo 7900 electric articulated,” 2019. [Online]. Tillgänglig: <https://www.volvobuses.com/content/dam/volvo-buses/markets/sweden/buses/volvo-7900-electric/specifications/Data%20-sheet-7900-Electric-Articulated-SE-2019.pdf>

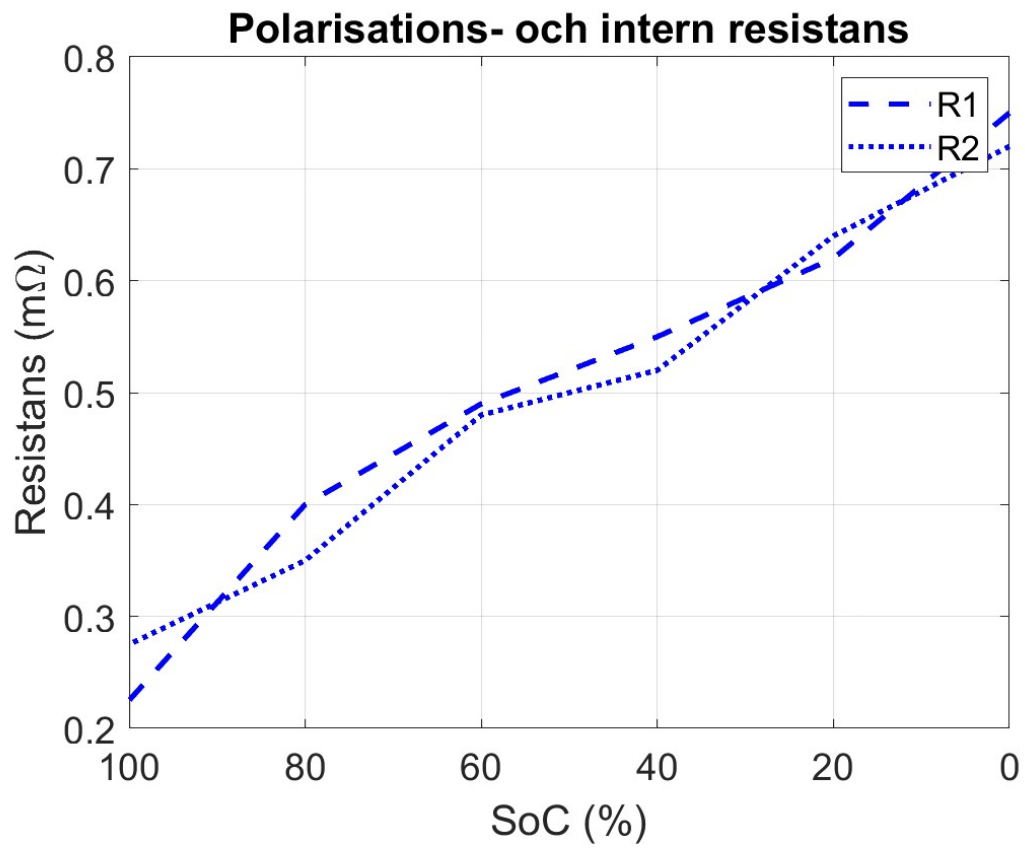
A

Parametrar för batteriets kretsmodell

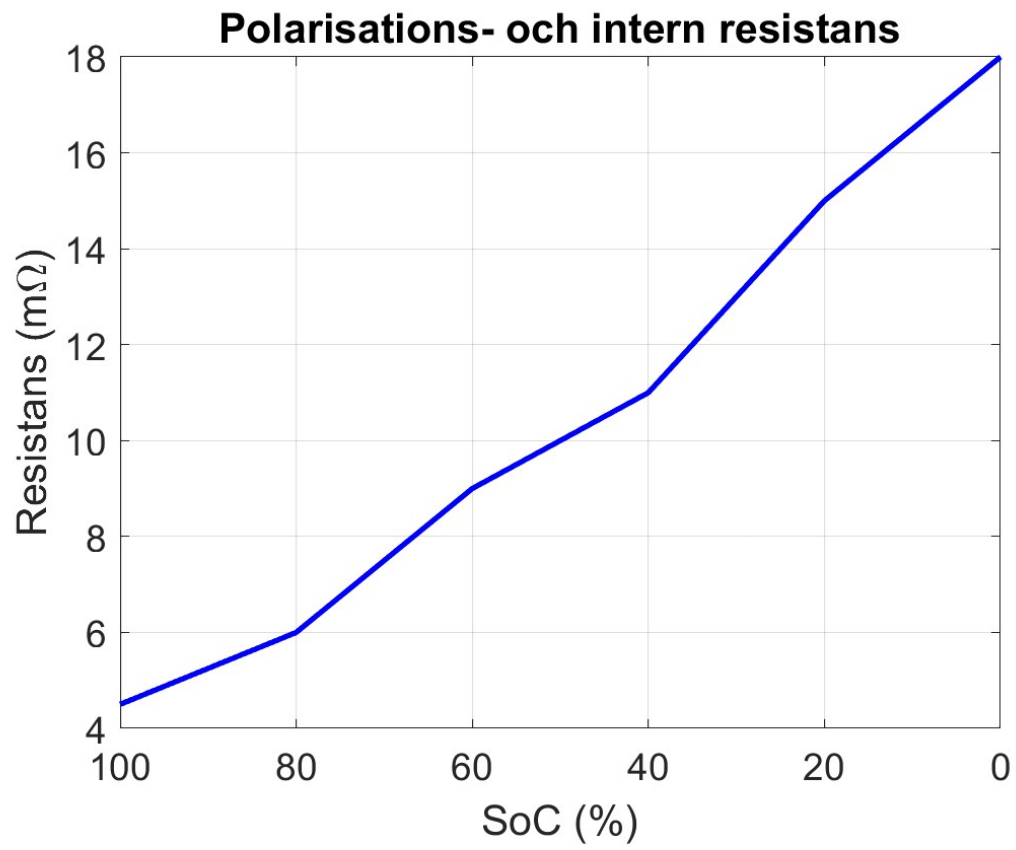
Nedan finns parametrar som använts vid modellering och simulering av batteriets kretsmodell. Dessutom presenteras sammanställd data från ett antal av dagens marknads bussbatterier.



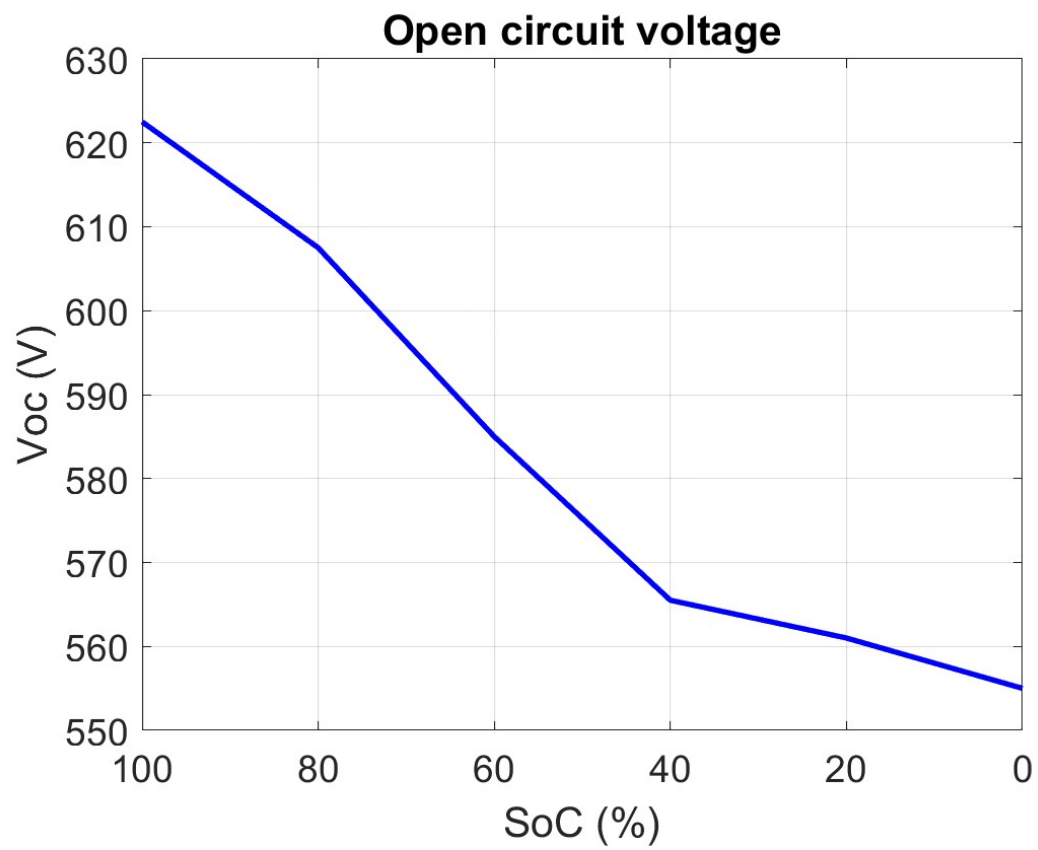
Figur A.1: C1 och C2 [14]



Figur A.2: R_1 och R_2 [14]



Figur A.3: Intern resistans R_{int} [14]



Figur A.4: Open circuit voltage [14]

B

Batterielektriska bussar på marknaden

Tabell B.1: Sammanställda tekniska data för eldrivna ledbussar

Yutong U18 LF [48]		
Kategori	Parameter	Värde
Batteriparametrar	Nominell energi	621.33 kWh
	Batterityp	Litiumjonbatteri
	Batterikemi	LFP (litiumjärnfosfat)
Klimat	Klimatsystem	HVAC
	Kyleffekt	72.1 kW
	Värmeeffekt	67.4 kW
Drivsystem	Maximal motoreffekt	240×2 kW
	Kontinuerlig effekt	120×2 kW
	Regenerativ bromsning	Ja
Dimensioner	Bussens längd	18 720 mm
	Bussens bredd	2 550 mm
	Bussens höjd	3 200 mm
Däck	Däckdimension	275/70R22.5
Passagerarkapacitet	Maximalt passagerarantal	125
	Antal sittplatser	45
MAN Lion's City 18 E [49]		
Kategori	Parameter	Värde
Batteriparametrar	Nominell energi	712 kWh
	Batterityp	Litiumjonbatteri

A. Parametrar för batteriets kretsmodell

	Batterikemi	NMC (nickel-mangan-kobolt)
Drivsystem	Maximal motoreffekt	400 kW
	Kontinuerlig effekt	267 kW
	Maximalt vridmoment	3 500 Nm
	Drivlina	Centralt drivsystem
Dimensioner	Bussens längd	18 100 mm
	Bussens bredd	2 550 mm
	Bussens höjd	3 300 mm
Passagerarkapacitet	Antal sittplatser	60

Mercedes eCitaro G 4 doors [50]

Kategori	Parameter	Värde
Batteriparametrar	Nominell spänning	650/750 V
	Nominell energi	444/555/666/777 kWh
	Antalet batterimoduler	4-7
	Energi per batterimodul	111 kWh
	Batterityp	Litiumjonbatteri
	Batterikemi	NMC4
	Laddning under drift	Ja, charging rail
Drivsystem	Maximal motoreffekt	440 kW
	Kontinuerlig effekt	360 kW
	Drivlina	E-axel
	Räckvidd	Upp till 480 km
Klimat	Klimatsystem	HVAC
Dimensioner	Totalvikt	29 000 kg
	Bussens längd	18 125 mm
	Bussens bredd	2 550 mm
	Bussens höjd	3 400 mm
Passagerarkapacitet	Maximalt passagerarantal	146
	Antal sittplatser	41

IVECO BUS E-WAY articulated 18 m [51]

Kategori	Parameter	Värde
	Nominell energi	346/416/485/554/624 kWh

Batteriparametrar

A. Parametrar för batteriets kretsmodell

	Antalet batterimoduler	5–9
	Energi per batterimodul	69.3 kWh
	Batterityp	Litiumjonbatteri
	Batterikemi	NMC (nickel-mangan-kobolt)
	Laddning under drift	Pantografladdning
Drivsystem	Max laddkraft	600 kW
	Maximal effekt	450 kW
	Vridmoment	4 000 Nm
	Drivlina	Centralt drivsystem
	Regenerativ bromsning	Ja
Klimat	Klimatsystem	HVAC
Dimensioner	Totalvikt	30 000 kg
	Bussens längd	17 960 mm
	Bussens bredd	2 550 mm
	Bussens höjd	3 234 mm
Passagerarkapacitet	Antal sittplatser	35

Solaris Urbino 18 electric [52]

Kategori	Parameter	Värde
Batteriparametrar	Nominell energi	800 kWh
	Användbar energi	640 kWh
	Laddningseffekt maximal	250 kW
	Batterityp	Litiumjonbatteri
	Batterikemi	NMC (nickel-mangan-kobolt)
	Laddning under drift	Pantografladdning
Räckvidd	Räckvidd	Upp till 600 km
Drivsystem	Motoreffekt maximalt	240 kW
	Motoreffekt kontinuerlig	240 kW
	Drivlina	Centralt drivsystem
Klimat	Klimatsystem	HVAC
	Kyleffekt	33 + 24 kW
	Värmeeffekt	37 kW
Dimensioner	Totalvikt	30 000 kg
	Bussens längd	18 000 mm

A. Parametrar för batteriets kretsmodell

	Bussens bredd	2 550 mm
	Bussens höjd	3 250 mm
Passagerarkapacitet	Maximalt passagerantal	145
	Antal sittplatser	52
Volvo 7900 Electric Articulated [53]		
Kategori	Parameter	Värde
Batteriparametrar	Nominell spänning	600 V
	Nominell energi	470/564 kWh
	Antalet batterimoduler	5–6
	Energi per batterimodul	94 kWh
	Batterityp	Litiumjonbatteri
	Batterikemi	NCA (nickel-kobolt-aluminium)
	Laddning under drift	Pantografladdning
Laddning	Laddningseffekt maximal	450 kW
Drivsystem	Maximal motoreffekt	400 kW
	Kontinuerlig effekt	337 kW
Klimat	Klimatsystem	HVAC
	Kyleffekt	58 kW
	Värmeeffekt	52 + 17 + 24 kW
Dimensioner	Totalvikt	30 000 kg
	Bussens längd	18 660 mm
	Bussens bredd	2 550 mm
	Bussens höjd	3 300 mm
Passagerarkapacitet	Maximalt passagerarantal	145

**INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA**

Göteborg, Sverige
www.chalmers.se



CHALMERS