



CHALMERS



Prestanda och räckvidd hos elektrifierade fordon

Dynamisk simulering av bilens räckvidd och prestanda

Kandidatarbete inom maskinteknik

Mohammad Ali Afshari
Alexander Häggglund
Zainab Nouri
Filip Rosén
Nima Salmanpour
Adam Stenman

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2021
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2021:13

Prestanda och räckvidd hos elektrifierade fordon

Dynamisk simulering av bilens räckvidd och prestanda

Kandidatarbete i mekanik och maritima vetenskaper

Mohammad Ali Afshari

Alexander Hägglund

Zainab Nouri

Filip Rosén

Nima Salmanpour

Adam Stenman



CHALMERS

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper

Avdelningen för fordonsteknik och autonoma system

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2021

Prestanda och räckvidd hos elektrifierade fordon
Dynamisk simulering av bilens räckvidd och prestanda
Mohammad Ali Afshari, Alexander Hägglund, Zainab Nouri, Filip Rosén, Nima
Salmanpour, Adam Stenman

© Mohammad Ali Afshari, Alexander Hägglund, Zainab Nouri, Filip Rosén, Nima
Salmanpour, Adam Stenman, 2021.

Handledare: Docent Jelena Andric, avdelningen för fordonsteknik och autonoma
system
Examinator: Biträdande professor Dr. Simone Sebben, avdelningen för fordonsteknik
och autonoma system

Kandidatarbete 2021:13
Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Avdelningen för fordonsteknik och autonoma system
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon: +46 (0)31-772 1000

Omslag: Tesla Model S, www.tesla.com.

Typsättning gjord i L^AT_EX
Göteborg, Sverige 2021

Sammandrag

Minskad användning av fossila bränslen för att driva fordon är en stor faktor till att begränsa den globala klimatförändringen. Därför har Sveriges regering satt som mål att hela fordonsflottan ska vara oberoende av fossila bränslen år 2030 [1]. Omställningen till elektriska fordon (EV) är en viktig del för att klara detta mål. Moderna bilföretag som Tesla och Mercedes utvecklar ständigt sina elektrifierade fordon för ökad komfort, prestanda och räckvidd. Syftet med detta projekt var att utveckla kunskap om simulering och med hjälp av denna kunskap förbättra räckvidden för ett antal elektrifierade bilmodeller genom simuleringar i Amesim, ett program för systemsimulering från Siemens Digital Industries Software.

Flera elbilar simulerades i olika körcykler. En förlustanalys gjordes för att undersöka energiförluster i fordonens olika komponenter. Med hjälp av denna analys kunde optimeringar av dessa faktorer göras med målet att minska energiförluster och därmed förlänga modellernas räckvidd. Resultat blev en förlängd räckvidd för samtliga modeller, i ett intervall mellan 14.5% och 25.6%.

Nyckelord: Simulering, Elbil, BEV, Prestanda, Amesim, Körcykel, Räckvidd

Abstract

Reducing the use of fossil fuels for vehicle propulsion is one of the key factors to limiting global climate change. For this reason, the Swedish government has set an ambitious goal that the entire vehicle fleet should be independent of fossil fuels by 2030 [1]. Electric vehicles (EVs) play an important role in achieving this goal. Modern car companies such as Tesla and Mercedes are constantly developing their electrified vehicles for increased comfort, performance and range. The purpose of this project was to develop knowledge about vehicle simulations and use it to improve the range of EVs through the system simulation platform Amesim made by Siemens Digital Industries Software.

Several electric vehicle models were simulated for different driving cycles. The energy analysis was performed to identify the energy losses in different vehicle components. With the help of this analysis, optimizations were performed to reduce the energy losses and thereby extend the range of the vehicle models. The optimizations resulted in an extended range for all models, ranging from 14.5% to 25.6%.

Förord

Vi i kandidatgruppen vill börja med att tacka vår handledare, Docent Jelena Andric, vid institutionen Mekanik och Maritima vetenskaper och avdelningen för Fordonsteknik och autonoma system. Hennes goda hjälp och engagemang har bidragit till värdefulla insikter och vägledning under projektets gång. En extra eloge för all din tid och för att du alltid har ställt upp när vi behövde.

Vi riktar även ett stort tack till vår examiner, Biträdande professor Dr. Simone Sebben, vid institutionen Mekanik och maritima vetenskaper och avdelningen för Fordonsteknik och autonoma system för all hjälp med praktisk information om projektets utformning och examination.

Slutligen vill vi unisont tacka Dr. Gunnar Latz, Presales Solutions Consultant vid Siemens Digital Industries Software och Jonathan Linderöth, masterstudent, vilka har varit till hjälp genom deras värdefulla kunskaper inom simuleringsprogrammet Simcenter Amesim.

Kandidatgruppen, Göteborg, maj 2021

Innehåll

Ordlista	xiv
Figurer	xv
Tabeller	xix
1 Introduktion	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Avgränsningar	2
2 Teori	3
2.1 Fordonsdynamik	3
2.2 Körcykler	4
2.2.1 NEDC	4
2.2.2 WLTC	5
2.2.3 EPA75	6
2.2.4 NYCC	6
2.3 Drivlina	7
2.3.1 Motor	7
2.3.2 Transmission	8
2.3.3 Batterier	8
2.4 Energiflöden och energiförbrukning	9
2.4.1 Värmeflöden och energiförluster	9
2.5 Energikalkyl	10
2.5.1 Regenererad Energi	10
2.5.2 Energianvändning	10
2.6 Simulering	10
3 Metod	11
3.1 WP1 - Informationshämtning	11
3.1.1 Tesla Model S P85	11
3.1.2 Tesla Model S P100D	12
3.1.3 Mercedes EQC	12
3.2 WP2 - Prestandasimulering	12
3.2.1 Hybrid Optimization Tool	12
3.2.1.1 Architecture definition	12

3.2.1.2	Architecture parameters	14
3.2.1.3	Strategy definition	19
3.2.1.4	Test case definition	19
3.2.1.5	Computation, Post processing	20
3.3	WP3 - Förlustanalys	21
3.3.1	Förluster luft och rullmotståndet	22
3.3.2	Förluster i motorn	23
3.3.3	Förluster i batteriet	23
3.4	WP4 - Optimering	24
3.4.1	Study manager	24
3.4.2	Batteri	25
3.4.2.1	Celltyp	25
3.4.2.2	Temperatur	25
3.4.3	Motor	26
3.4.3.1	Motortyp	26
3.4.3.2	Utväxling	26
3.4.4	Bilens motstånd	26
3.4.4.1	Luftmotstånd	26
3.4.4.2	Däckbredd	27
4	Resultat	29
4.1	WP1 - Informationsinhämtning	29
4.2	WP2 - Prestandasimulering	29
4.3	WP3 - Förlustanalys	30
4.3.1	Motståndsenergi	30
4.3.2	Förluster i motor	31
4.3.3	Förluster i batteri och totalt	31
4.4	WP4 - Optimeringsscenario	31
4.4.1	Batteriteknik	31
4.4.2	Utväxling	33
4.4.3	Temperatur	35
4.4.4	Däckbredd	36
4.4.5	Efter optimering	37
4.4.5.1	Motståndsenergi	38
4.4.5.2	Förluster i motor	38
4.4.5.3	Förluster i batteri och totalt	38
5	Diskussion	39
5.1	WP1 - Informationshämtning	39
5.2	WP2 - Prestandasimulering	39
5.3	WP3 - Förlustanalys	40
5.4	WP4 - Optimering	40
5.4.1	Batteriteknik	40
5.4.2	Utväxling	40
5.4.3	Temperatur	42
5.4.4	Däckbredd och luftmotstånd	42

6	Slutsats	45
A	Appendix: Information om P85	I
B	Appendix: Information om P100D	V
C	Appendix: Information om EQC400	IX

Ordlista

Begrepp och förkortningar som används ges nedan en kort förklaring.

Battericell	Batteri i dess minimala formfaktor, med spänning runt 1-6V beroende på kemi och konstruktion.
Batterimodul	Flertal battericeller sammankopplade i serie eller parallellt.
Batteripack	Flertal batterimoduler sammankopplade i serie eller parallellt, för att uppnå den spänning och kapacitet som bilen fordrar.
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i> , elbil där elektrisk energi hämtas ur batteripack.
EPA	U.S. Environmental Protection Agency.
HOT	<i>Hybrid Optimization Tool</i> , ett verktyg i Siemens Amesim som automatiskt bygger en simuleringsmodell.
Körcykel	Ett standardiserad körmönster som avser simulera verklig körning, genom acceleration, broms, start & stopp. Mäter bl.a utsläpp, räckvidd och bränsleförbrukning.
SOC	<i>State of Charge</i> anger batterikapacitet relativt fulladdat, i procent.
Räckvidd	Den sträcka en elbil kan färdas från fulladdat till minsta tillåtna SOC.
NEDC	<i>New European Driving Cycle</i> , numer utdaterad körcykel. Kritiserad för att vara för "snäll" och ge orealistiska resultat.
NYCC	<i>New York City Cycle</i> körcykel som representerar körning i stadstrafik.
WLTC	<i>Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicle Test Cycle</i> , körcykel som numer är europeisk standard.

Figurer

2.1	Illustration som visar krafter verkande på fordonet.	3
2.2	Hastighetsprofil för NEDC	5
2.3	Hastighetsprofil WLTC	5
2.4	Hastighetsprofil FTP-75	6
2.5	Hastighetsprofil NYCC	7
2.6	Verkningsgraden för en HVH410 elmotor enligt [12]. Det noteras att den generellt ligger på omkring 90% och att det därför inte är helt orimligt att approximera den som konstant, men att verkningsgraden särskilt för låga varvtal är betydligt lägre.	8
2.7	Illustration av hur batteriet i en elbil är uppbyggd i flera steg. Från enskilda celler som minsta formfaktor sammankopplade i moduler, som i sin tur bildar ett komplett batteripack.	9
3.1	HOT - Definition av fordonets grundläggande uppbyggnad i HOT. Här visas arkitekturen “Electric”, som modellerar BEV med en motor.	13
3.2	HOT - Arkitektur med dubbla elmotorer. Observera att GEN och MOT modelleras på samma sätt, endast benämningen skiljer.	13
3.3	HOT - Definition av fordonsdata. Här angavs parametrar såsom dess massa, information om däck, och ett beräknat rullmotstånd som togs fram med verktyget i figur 3.4.	14
3.4	HOT - Vehicle roller test bench coefficients tool. Ett verktyg som tog fram de olika rullmotståndskoefficienterna som Amesim använder för att beräkna den totala motståndskraften hos fordonet.	15
3.5	HOT - Motorparametrar. Visar de vridmoments-mappar som har genererats.	16
3.6	HOT - Electric motor creator tool, ett verktyg i HOT för att automatiskt generera motormappar efter några givna variabler såsom effekt, moment och motortyp.	17
3.7	HOT - Batteriparametrar. Om verktyget battery pre-sizing tool används fylls detta i automatiskt. Maximum och minimum SOC samt maximum charge/discharge power kan dock behöva ändras härifrån.	18
3.8	HOT - Battery Pre-Sizing Tool. Skapar ett batteripack av vald batteriteknik efter ett antal satta parametrar, t.ex. spänningsnivå och energiinnehåll.	19

3.9	HOT - Test case definition. Här väljs körcykel och andra data som har med själva simuleringen att göra, såsom extra strömförbrukare och initial SOC.	20
3.10	HOT - Display summary. Visar resultaten av simuleringen, energiflöden och prestanda.	21
3.11	HOT - Displacement. Graf av sträcka färdad över tid.	21
3.12	HOT genererar en komplett Amesim Sketch som modellerar fordonet efter satta parametrar i HOT. I figuren syns delar som motor och batteri i underkant, förare och fordon i överkant.	22
3.13	Postprocessing i HOT visar översiktligt vilka energiförluster som påverkar fordonet, och till hur stor del.	23
3.14	Amesim - Optimering. Valda parametrar för att köra en optimering baserad på Genetic Algorithm.	25
4.1	Batteriets spänning för olika celltekniker med samma kapacitet. Detta för en Tesla P85 som kör WLTC cykeln upprepade gånger med ett fulladdat batteri tills det är slut. Vi ser att LFP-C cellerna har liknande mönster samt att NCA-C och NMC-C också är nästan identiska. Vidare ser vi att LFP-C cellerna börjar vid en högre spänning men tappar strax innan cutoff som för P85 är vid 6% SOC. I jämförelse har NCA-C och NMC-C en stabilare spänningsnivå genom hela SOC intervallet.	32
4.2	Batteriets interna resistans för olika celltekniker med samma kapacitet. Detta för en Tesla P85 som kör WLTC cykeln upprepade gånger med ett fulladdat batteri tills SOC nått 0%. Det noteras att samtliga ökar kraftigt för låga SOC vilket uppnås efter lång tids körning, alltså till höger i grafen. NMC-C verkar ha lägst intern resistans medan prismatic LFP-C har högst genom majoriteten av SOC intervallet. Vidare observeras att sambanden som noterades i figur 4.1 ej kan ses här.	33
4.3	Utväxlingen R_m påverkan på räckvidden och accelerationen för Tesla P85. Verktyget study manager som är beskrivet i 3.4 användes för att med en algoritm optimera utväxlingen så att batteriåtgången (delta SOC) skulle minimeras för en körcykel, vilket är ekvivalent med att räckvidden maximeras. Utväxlingens påverkan på accelerationen togs fram manuellt för 14 olika mätpunkter. Det noteras att accelerationen blir högre för högre utväxlingar medan räckvidden maximeras för $R_m = 4.77$	34
4.4	Utväxlingen R_m påverkan på räckvidden och maxhastigheten för Tesla P85. Batteriåtgången togs fram på samma sätt som står beskrivet i figur 4.3. Utväxlingens påverkan på maxhastigheten togs fram manuellt i HOT. Grafen visar att maxhastigheten generellt ökar för lägre utväxling men att ökningen stannar av vid $R_m \approx 7$ och lägre.	34

4.5	Utväxlingen R_m påverkan på motorns verkningsgrad, vridmoment och varvtal då den optimerades för att minimera batteriåtgången. Det framkommer att högsta verkningsgrad korresponderar med minska batteriåtgången och längsta räckvidden enligt figurerna 4.3 och 4.4, dvs $R_m = 4.77$	35
4.6	Batteriåtgången som krävdes för att köra en körcykel bestående av de fyra olika cyklarna (NEDC, WLTC, FTP75, NYCC) på varandra följande. Det noteras att den förblir konstant och att räckvidden därmed är konstant, dvs inget samband finns i modellen för P85. Samma resultat erhöles för de övriga fordonen.	36
4.7	Däckbreddens påverkan på energiförbrukningen för en körcykel. Det noteras att bak och framhjulen påverkar energiförbrukningen olika. Smala bakdäck ger högre förbrukning och kortare räckvidd medan smala framdäck ger aningen lägre förbrukning och längre räckvidd.	37
5.1	Vridmomentet för Porsche Taycan med två växlar från [24] som en funktion av hastigheten jämfört med en växel. Det är tydligt att speciellt för låga hastigheter är vridmomentet betydligt högre men även över hela hastighetsregistret.	41
A.1		II
A.2		III
A.3		IV
B.1		VI
B.2		VII
B.3		VIII
C.1		X
C.2		XI
C.3		XII

Tabeller

2.1	Jämförelse av de körcykler som använts i projektet.	4
4.1	Inhämtad information om räckvidd i kilometer	29
4.2	Prestanda enligt tillverkaren	29
4.3	Simulerad räckvidd i kilometer	30
4.4	Simulerad prestanda	30
4.5	Energiåtgång för rullmotstånd och luftmotstånd för körcykelkombinationen WLTC+NEDC+FTP75+NYCC	30
4.6	Förluster i motor för WLTC+NEDC+FTP75+NYCC	31
4.7	Förluster i batteri för WLTC+NEDC+FTP75+NYCC	31
4.8	Tabell som visar skillnaden för olika batteritekniker	32
4.9	Resultat av optimering	37
4.10	Procentskillnaden efter optimering	38
4.11	Energi för rullmotstånd och luftmotstånd för alla körcykler kombinerat, WLTC + NEDC + FTP75 + NYCC	38
4.12	Förluster i motor för alla körcykler kombinerat, WLTC + NEDC + FTP75 + NYCC	38
4.13	Förluster i batteri för alla körcykler kombinerat, WLTC + NEDC + FTP75 + NYCC	38

1

Introduktion

Klimatförändringar och till följd av det lagändringar har under de senaste åren gjort att större krav ställts på att utsläppen av växthusgaser ska minska. Detta berör inte bara fordon, utan i princip alla källor till utsläpp som industri och produktion. Mot den bakgrunden är det tydligt att även fordonsflottan, som står för 30% av Sveriges totala koldioxidutsläpp [2], måste ingå i förändringen. Regeringen har satt ett mål om att utsläpp från fordon ska minska med 70% till år 2030, vilket är ett av de mest ambitiösa målen i världen. Det finns flera intressanta lösningar som ämnar till att avkarbonisera fordonsflottan. Ett av de mest aktiva alternativen är de helelektriska fordonen, eller Battery Electric Vehicle (BEV). Försäljningen av dessa fordon har blivit en global trend på grund av egenskaper som låga utsläpp, låg ljudnivå, hög hastighetsrespons samt hög köreffektivitet.

1.1 Bakgrund

De helelektriska fordonen har alltså många fördelar gentemot fordon med förbränningsmotorer, men begränsad räckvidd är fortsatt en anledning för vissa konsumenter att hålla fast vid konventionellt drivna fordon [3]. Räckvidden, hur långt bilen kan köra på en laddning, behöver alltså förbättras för att en BEV ska bli attraktiv för fler och därmed påskynda omställningen till fossilfritt. För att förbättra räckvidden behövs en förståelse för hur energiförbrukningen i en elbil ser ut, vilka förluster som finns och vart det finns utrymme för förbättringar.

Flera tidigare studier har undersökt hur olika sorters körning relaterar till energiförbrukning och räckvidd genom att undersöka körcykler, [4], [5]. I detta projekt undersöktes energianvändningen i elbilar med mer fokus på att förbättra bilens effektivitet snarare än att påvisa skillnader i körsätt. Studien genomfördes med datorsimuleringar. I samband med det undersöks även hur väl simuleringsresultaten stämmer överens med verkliga siffror, närmare bestämt de siffror som biltillverkarna publicerar.

1.2 Syfte

Syftet med projektet var att undersöka olika optimeringsalternativ för fordonen för att förbättra dess räckvidd med hjälp av programmet Amesim som är ett kommersiellt program som används i industrin för att simulera bilar. En del av simuleringarna i

Amesim syftade dels till att jämföra resultaten av datorbaserad simulering med verkliga värden, för att bedöma om metoden var tillförlitlig och trovärdig. Överensstämmande värden verifierar att resultaten som producerats är jämförbara med verkligheten. Målet var att undersöka ifall en förbättring om 10% kunde uppnås och i så fall vilka optimeringsscenarion som hade rekommenderats. Ett annat syfte var att skapa en förståelse för programmet Amesim samt undersöka energiflöden och värmeförluster i drivlinan hos elektrifierade fordon.

1.3 Avgränsningar

Projektet utfördes som kandidatarbete och var därmed tidsbegränsat till våren 2021. Arbetet producerade digitala simuleringsmodeller för olika modeller (BEV), vilka kan ses som ett förslag till generell lösning till förlängd räckvidd. Projektets parametrar har hämtats från publicerad, publikt tillgänglig data. Ingen experimentell data har samlats in för validering av metoden, eftersom resultaten av simuleringen räcker för att observera trender.

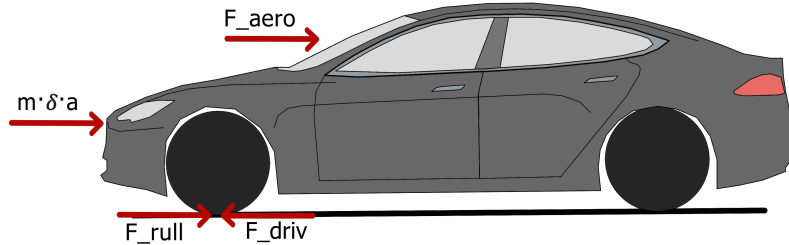
2

Teori

För undersökning av prestanda och räckvidd hos fordon bör hänsyn tas till olika parametrar som påverkar resultatet. Dessa kan exempelvis vara rullmotståndet, som i sin tur är en funktion av andra parametrar, batteriets storlek och kemi eller körcykeln som simuleras. För att få en förståelse för hur de påverkar och hur de ska styras för att nå önskad prestanda eller räckvidd är det därför viktigt att ha kunskap om teorin bakom dessa begrepp. Nedan förklaras de parametrar som berör projektet.

2.1 Fordonsdynamik

För att ett fordon ska kunna accelerera krävs att den drivande kraften F_{driv} vid däckens överkommer det motstånd som verkar på fordonet, enligt [6] och ekvation (2.1). Dessa motstånd kan sammanfattas som F_{mot} enligt ekvation (2.2). Figur 2.1 nedan visar de krafter som verkar på fordonet, bortsett från lutningsmotstånd då vägbanan är platt.



Figur 2.1: Illustration som visar krafter verkande på fordonet.

$$F_{driv} - F_{mot} = m \cdot \delta \cdot a \quad (2.1)$$

$$F_{mot} = F_{rull} + F_{aero} \quad (2.2)$$

Där F_{rull} och F_{aero} beräknas enligt ekvation (2.3) respektive (2.4).

$$F_{rull} = C_r \cdot m \cdot g \quad (2.3)$$

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot A_f \cdot \rho_l \cdot v_{bil}^2 \quad (2.4)$$

F_{rull} är rullmotstånd och F_{aero} luftmotstånd. Vidare är m fordonets vikt, a dess acceleration och δ är en korrektionsfaktor som kompenserar för att däckets måste

accelereras både genom rotation såväl som genom translation. Enligt [4] kan δ antas vara konstant 1.04. Vidare är C_r en rullkoefficient, C_D en formberoende koefficient för luftmotstånd och A_f fordonets area sett rakt framifrån. Luftens densitet benämns ρ_l och v_{bil} är fordonets hastighet. Ingen körcykel som används i projektet innefattar någon lutning, därför bortses dess effekt på fordondynamiken.

För de fall då fordonets area inte är känt kan arean approximeras som i ekvation (2.5), enligt [7]. Denna faktor syftar till att ta bort de ytor av kvadraten som inte upptas av fordonet, som t.ex ytan mellan bilen och väglaget och rundade hörn runt bilens profil.

$$A_f = \text{frontal höjd} \cdot \text{frontal bredd} \cdot 0.85 \quad (2.5)$$

2.2 Körcykler

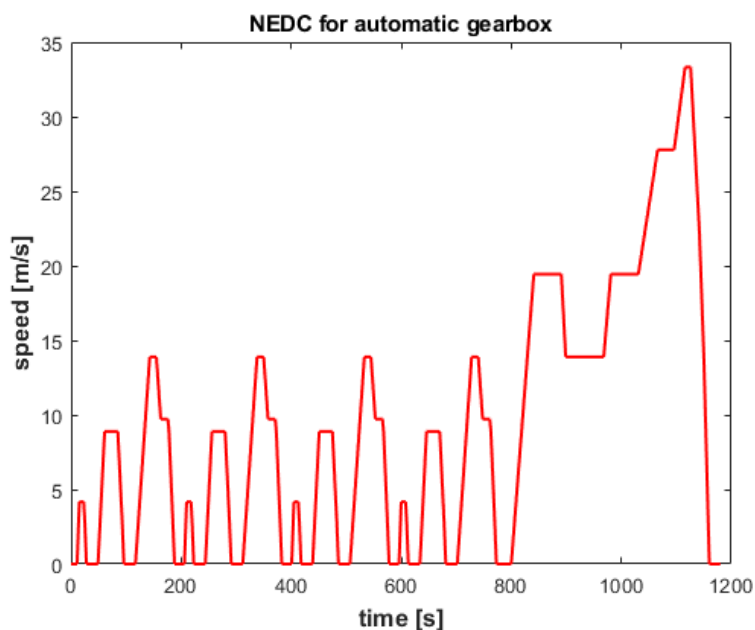
En körcykel är ett standardiserad körmönster som avser simulera verklig körning genom t.ex acceleration, broms, start och stopp. Man mäter saker som utsläpp, räckvidd och energiförbrukning. De används för att bilar ska kunna jämföras mot varandra på samma villkor, och verifiera att fordonet håller sig inom gällande lagstiftning. De används också för att jämföra olika fordons prestanda och räckvidd gentemot varandra. Beroende på vilken typ av körning man vill analysera används olika cykler med varierande egenskaper. Nedan i tabell 2.1 följer en jämförelse av de körcykler som kommer användas i projektet, samt en kort beskrivning sammanfattad från [8]. Hastighetsprofilerna för körcyklerna har hämtats från Amesim.

Tabell 2.1: Jämförelse av de körcykler som använts i projektet.

Körcykler				
Körcykel	Tid [s]	Tid stillastående [s]	Distans [km]	Medelhastighet [km/h]
NEDC	1180	279.7 [9]	10.92	34
WLTC	1800	226.8 [9]	23.27	46.5
NYCC	600	233 [5]	1.9	11.4
FTP-75	2479	941	17.76	34.1

2.2.1 NEDC

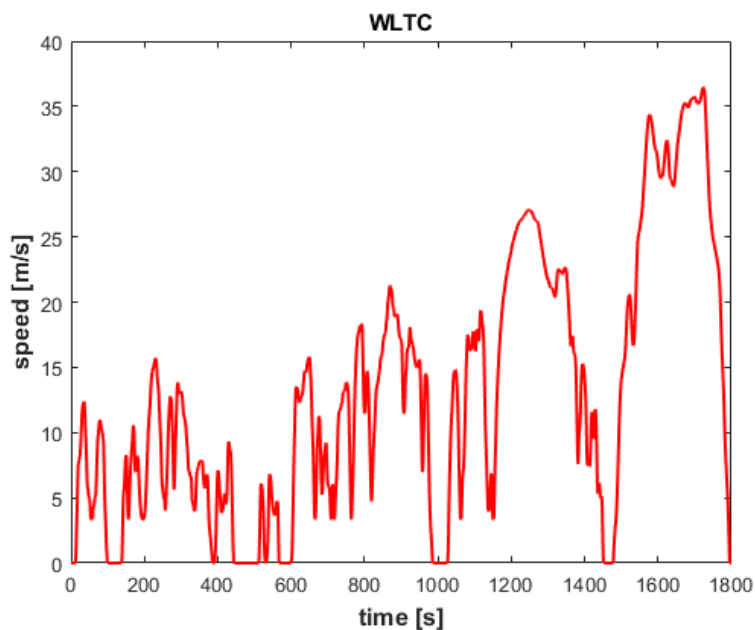
New European Driving Cycle, är en numera utdaterad körcykel. Den är kritiserad för att vara för "snäll" och därmed ge orealistiska resultat som inte stämmer överens med hur en genomsnittlig förare kör. Körcykeln simulerar en körsträcka på 10,9 km och den totala tiden är 1180 sekunder. Medelhastigheten under körningen är 34 km/h och maxhastigheten som uppnås är 120 km/h. Hastighetsprofilen är enligt figur 2.2 där körningen inleds med lägre tempo, och avslutas med högre hastighet.



Figur 2.2: Hastighetsprofil för NEDC

2.2.2 WLTC

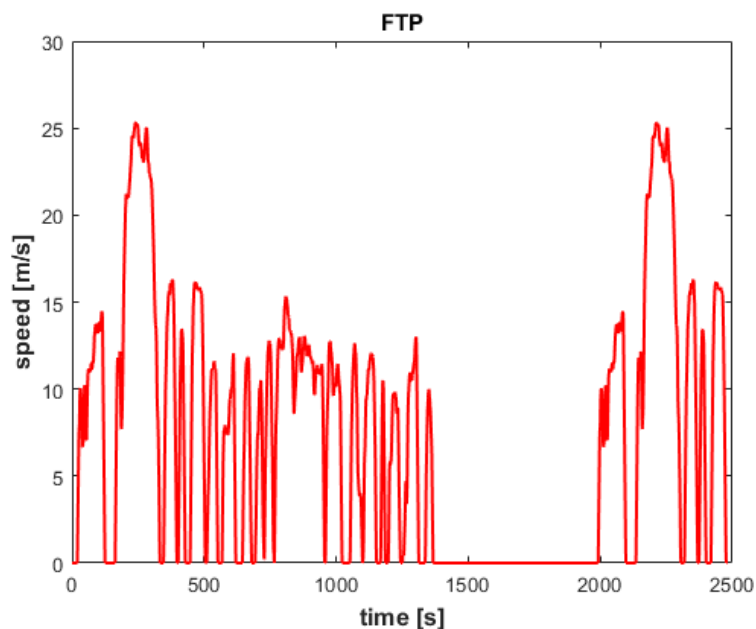
Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicle Test Cycle, är den körcykel som är europeisk standard för certifiering av fordon. Den togs fram som en ersättare till NEDC för att få värden som bättre överensstämmer med verklig körning. Körningen pågår i 1800 sekunder och total distans är 23,25 km. Körningen följer hastigheten i figur 2.3 där medelhastigheten är 46,5 km/h och maxhastigheten är 131 km/h.



Figur 2.3: Hastighetsprofil WLTC

2.2.3 EPA75

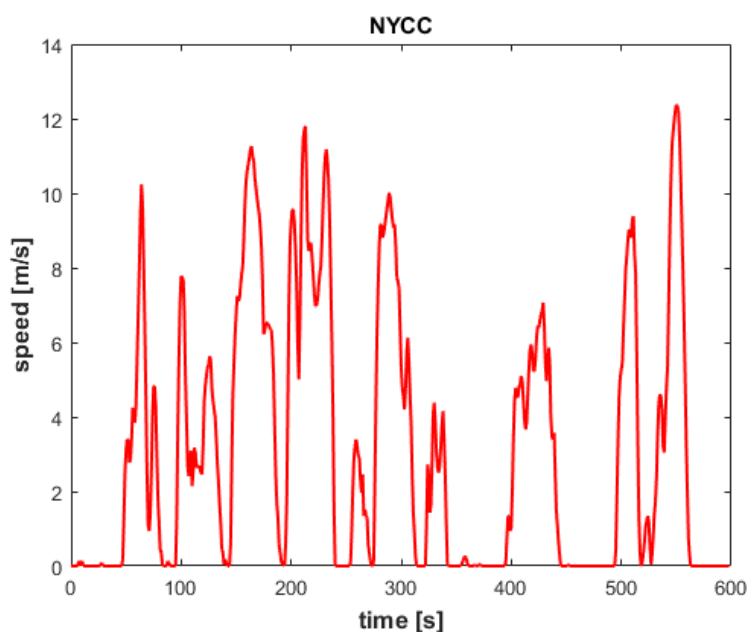
Vid certifiering av fordon i USA används *Federal Test Procedure*, med förkortningen FTP-75. Denna körcykel består av två på varandra följande delar, där fordonet kallstartas i början. Efter dessa två delar sker som visas i figur 2.4 en paus på ca 15 minuter där fordonet är avstängt. Efter detta körs sedan fas ett av cykeln igen men med varm motor.



Figur 2.4: Hastighetsprofil FTP-75

2.2.4 NYCC

New York City Cycle är en körcykel som representerar körning i stadstrafik. Det gör att körcykeln har en väldigt låg snitthastighet på endast 11.4 km/h och det tar 600 sekunder att köra distansen på 1.9 kilometer. Som visas i figur 2.5 har körcykeln många accelerationer och inbromsningar, något som ställer höga krav på effektiv regenerativ bromsning för att återhämta energin och ladda batteriet.



Figur 2.5: Hastighetsprofil NYCC

2.3 Drivlina

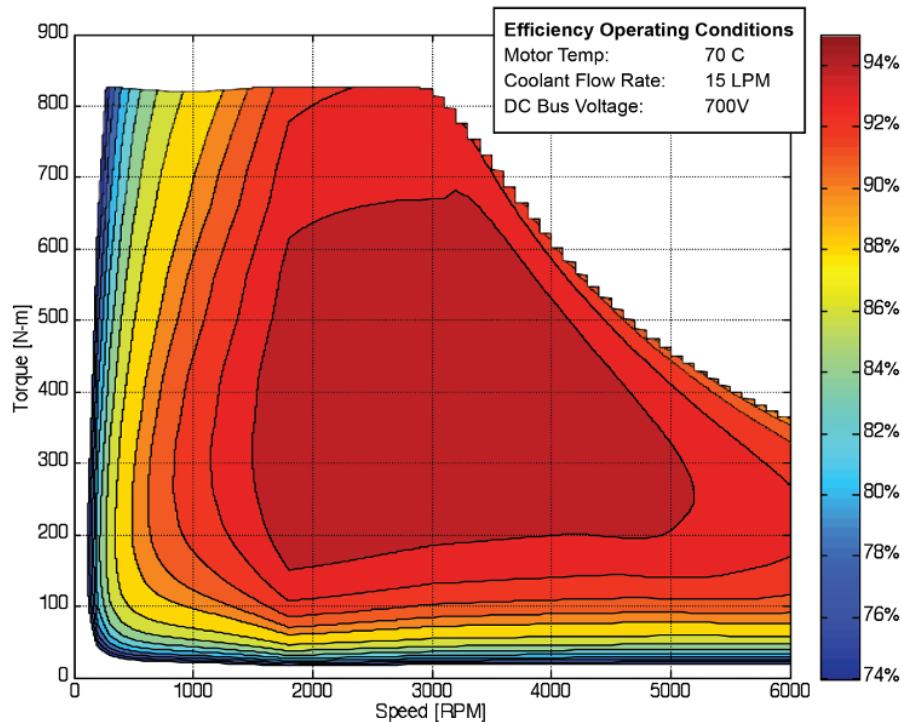
Utvärdering av drivlinan är en viktig del av förståelsen och analys av fordonsdynamik, speciellt när det gäller prestanda och räckvidd vid simulering. Det är drivlinan som avgör fordonets prestanda i termer av till exempel energiförbrukning per körd sträcka, acceleration eller de maximala belastningsnivåer som fordonet kan klara av under körningen.

2.3.1 Motor

I BEV används en eller flera elmotorer för framdrivning och rekuperation av energi. Det finns tre huvudtyper av elektriska motorer som biltillverkarna använder beroende på fordonets specifikationer. Dessa är *brushless asynchronous induction*, *brushed externally excited synchronous* och *brushless permanent magnet synchronous* [10]. En asynkron växelströmsmotor, som är den vanligaste motortypen, är byggd av en stationär del och en rörlig del. Den rörliga delen är placerad inuti den stationära delen. Med hjälp av en växelström skapas fyra magnetiska fält som får den rörliga delen att rotera [11].

Ingen elmotor har en verkningsgrad på 100%, det vill säga att all ingående elektrisk energi blir mekanisk energi. Det finns alltid förluster vilket lätt inses då alla elmotorer vid belastning blir varma. Hur stora förlusterna för en viss elmotor är beror enligt [12] främst på två parametrar, motorns varvtal och dess vridmoment. Man skulle kunna göra approximationen att verkningsgraden är konstant, men då BEV i regel ej har någon växellåda skulle man i det fallet förlora information rörande varvtalsberoende parametrar i det avseendet. Idealt skulle data för specifika motorer

användas, men i de fall där dessa saknas kan de approximeras genom att specifikationer från en generell BEV asynkronmotor används. I figur 2.6 från [12] kan vi se hur verkningsgraden för en HVH410 asynkronmotor förhåller sig till varvtalet och vridmomentet. Grafer av detta slaget kallas *motormapp* och är helt enkelt en karta för vilken verkningsgrad som korresponderar med ett visst varvtalet och vridmoment.



Figur 2.6: Verkningsgraden för en HVH410 elmotor enligt [12]. Det noteras att den generellt ligger på omkring 90% och att det därför inte är helt orimligt att approximera den som konstant, men att verkningsgraden särskilt för låga varvtalet är betydligt lägre.

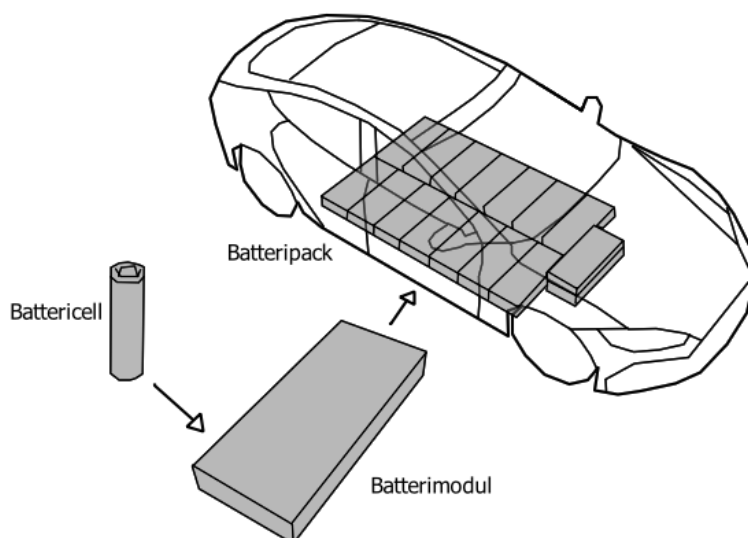
2.3.2 Transmission

Växellådor är nödvändiga för att få till en utväxling som tillåter motorer, vare sig det är elmotorer eller förbränningsmotorer, att arbeta i lämpliga varvtalet. Även här finns förluster som påverkas av faktorer såsom hastighet, belastning eller temperatur. De flesta växellådor har enligt [8] en verkningsgrad på 95-97% och 97% enligt [13] vilket även är värdet som kommer användas vid modelleringen. Vidare har Tesla Model S P85 en utväxling på 9,73 vilket kommer antas gälla för samtliga bilar. Det antas vara ett mestadels rimligt antagande då exempelvis [5] ansätter en utväxling på 10.

2.3.3 Batterier

Batteriets grundkonstruktion är uppbyggt genom att celler parallellkopplas för att uppnå högre kapacitet och seriekopplas för att uppnå en högre spänning. Ofta sker detta i block, spänningen batteriet ger är då $a * b$ volt, där a står för antal block som seriekopplas och b står för spänningen på blocken. Det totala energinnehållet i

batteriet är den totala spänningen multiplicerat med den totala kapaciteten. Figur 2.7 nedan visar hur ett fordons batteripack består av flera batterimoduler, som i sin tur består av flera battericeller. En battericell är den minsta formfaktorn, och varierar i spänning och kapacitet beroende på kemi och konstruktion.



Figur 2.7: Illustration av hur batteriet i en elbil är uppbyggd i flera steg. Från enskilda celler som minsta formfaktor sammankopplade i moduler, som i sin tur bildar ett komplett batteripack.

2.4 Energiflöden och energiförbrukning

Det är körningsbeteendet i körcyklerna, till exempel acceleration och hastighet, som påverkar energiflöden och energiförbrukningen i ett BEV-fordon. Den lägsta energiförbrukningen uppkommer under konstant hastighet i intervallet 20-30 km/h och detta beror på att de bromsande krafterna på bilen blir låga. Högre farter leder till större hjularbete vilket leder till en kraftig ökning av energiförbrukningen. Energiförbrukningen påverkas även av den återhämtade energin vid regenerativ bromsning. Denna form av bromsning sker mest under NYCC. Dessutom påverkas energiförbrukning självklart av en ökad acceleration.

2.4.1 Värmefflöden och energiförluster

Energiförluster förekommer i alla typer av rörelse och maskiner. En del av energin som omvandlas eller transporteras går åt till värme på grund av faktorer som friktion. Detta finns även i elbilar då varje steg av energiomvandlingen skapar energiförluster vilket är något som inte kan undvikas men målet är att dessa skall minskas så mycket som möjligt. Förlusterna kommer undersökas senare i rapporten, då en del av optimeringen sker genom att minska dessa förluster.

2.5 Energikalkyl

Här beskrivs formler för energin som går in och ut ur batteriet.

2.5.1 Regenererad Energi

Den regenererade energin är enligt [5] den energi som återvinns via regenerativ bromsning och mäts som den energi som matas in i batteriet under en mätning. Denna bestäms av

$$E_{reg} = \frac{\int P_{el,pos} dt}{s} \quad (2.6)$$

där $P_{el,pos}$ är den positiva effekten in i batteriet och s är den totala sträckan som färdats.

2.5.2 Energianvändning

Använd energi är enligt [5] den energi som batteriet har tillfört minus den regenererade energin och bestäms av

$$E_{anv} = \frac{\int P_{el,neg} dt}{s} \quad (2.7)$$

där $P_{el,neg}$ är den negativa effekten in i batteriet, eller ekvivalent den positiva effekten *ut* ur batteriet och s återigen är sträckan som färdats.

2.6 Simulering

Simulering sker i huvudsak för att spara tid och resurser eller för att det inte finns möjlighet att göra verkliga tester. Simuleringen i detta projekt utförs genom att ge programmet Amesim olika data om bilen och sedan avgöra vilken typ av simulering som skall köras. Indata kan innefatta bilens egenskaper som till exempel vikt, luftmotstånd och specifika egenskaper som modellens motor kan ha. Sedan körs simuleringen beroende på vilken typ av körcykler som ska undersökas. Detta innebär att programmet simulerar hur en bil med de givna egenskaper hade presterat under en körcykel. Därefter fås olika värden som utdata vilka kan undersökas som resultat.

3

Metod

Arbetet delades upp i fyra olika delar. Första delen WP1 (*Work Package 1*) handlade primärt om att söka information runt utvalda bilmodeller. Dessa modeller är Tesla Model S P85, Tesla Model S P100D samt Mercedes EQC 400. Syftet med denna information var att specificera de ingående komponenter som bilarna har samt bestämma deras parametrar.

I nästa steg (*Work Package 2*) påbörjades simuleringar av olika modeller. Genom att simulera olika körcykler (t.ex. amerikanska EPA samt europeiska WLTC) fastställdes räckvidden för modellerna. Vidare undersöktes även prestandan för samtliga fordonsmodeller i Amesim.

Efter simuleringsfasen undersöktes energiflöden och värmeförluster i modellernas motorer och batterier (*i Work Package 3*). Detta gjordes genom att undersöka hur resultaten från simuleringar ändras beroende på olika parametrar.

Slutligen optimerades modellerna för att uppnå en högre effektivitet och därmed kunna åstadkomma en längre räckvidd (*i Work Package 4*).

3.1 WP1 - Informationshämtning

För att kunna generera modeller som är tillförlitliga och vars resultat har potential att vara verklighetstroget behövdes tillförlitlig information om fordonen när det är möjligt eller välavvägda förenklingar och approximationer när det inte är möjligt att erhålla tillräckligt med information. Då det finns en ovilja bland fordonstillverkare att publicera mer än endast säljande och den grundläggande tekniska information fick ett antal parametrar ansättas enligt data från alternativa källor från nätet.

3.1.1 Tesla Model S P85

Den största delen av fordonsegenskaper såsom motorparametrar, batteriparametrar eller fordonsdata som har använts vid simulering av denna modell är hämtade från en instruktionsvideo [14] som har skapats av Siemens samt från Teslas egen hemsida.

3.1.2 Tesla Model S P100D

I detta fallet var den tillgängliga informationen mer knapphändig då [14] endast innehöll information för Model S P85. Detta gjorde det nödvändigt att ta fram parametrarna från alternativa källor. Bland annat artiklar från nyhetssidor på nätet [15]. Även externa parter som själva plockat isär exempelvis batterierna och undersökt uppbyggnaden [16], och helt enkelt bilentusiaster som sammanställt alla specifikationer på en plats [17]. Parametrar som utväxling ansågs vara identiska med P85 vilket även var i linje med värdet som används i [5].

3.1.3 Mercedes EQC

Även i detta fall var det likt modell P100D svårt att ta fram data om fordonet, så utöver nyhetsartiklar och fordonsmagasin på internet [18] användes information från Transportstyrelsen [19]. En sökning på ett registreringsnummer för en EQC 400 gav information om maxhastighet och mått. Data om fordonets frontalarea fanns ej tillgänglig och därför behövdes den tas fram som beskrivet i ekvation (2.5), med mått angivna enligt [20].

3.2 WP2 - Prestandasimulering

Programmet Simcenter Amesim från Siemens möjliggör simulering av fordonsprestanda med relativt begränsad bakgrundsinformation om dess delar. Användning av detta program har varit betydligt fördelaktigt för projektet då det inte fanns tillgång till exakta och fullständiga fordonsdata från säkra källor. Framför allt användes funktioner såsom HOT (Hybrid Optimization Tool) som med begränsad data genererar en simuleringsmodell.

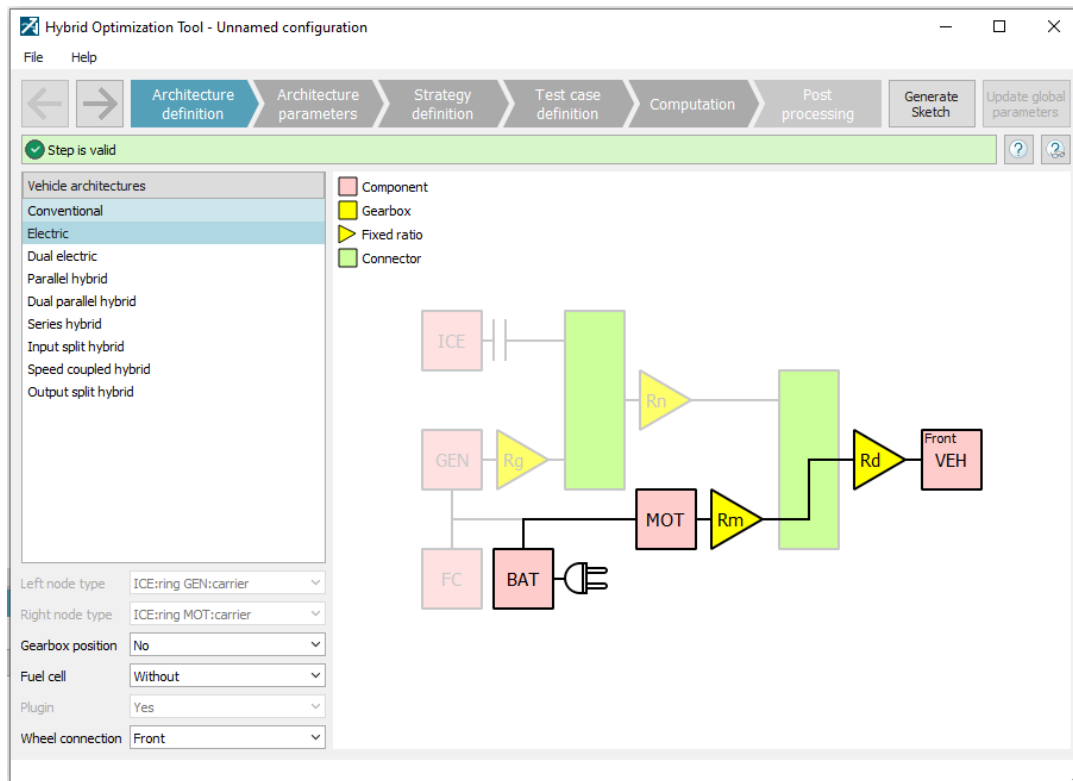
3.2.1 Hybrid Optimization Tool

HOT är ett verktyg där den kända data som samlats in om de studerade modellerna matades in. Sedan genererades ett komplett Amesim-system. Därifrån kunde intressanta parametrar plottas. Nedan följer en kort beskrivning av stegen i HOT, enligt projektets erfarenheter från användning samt manualen [21].

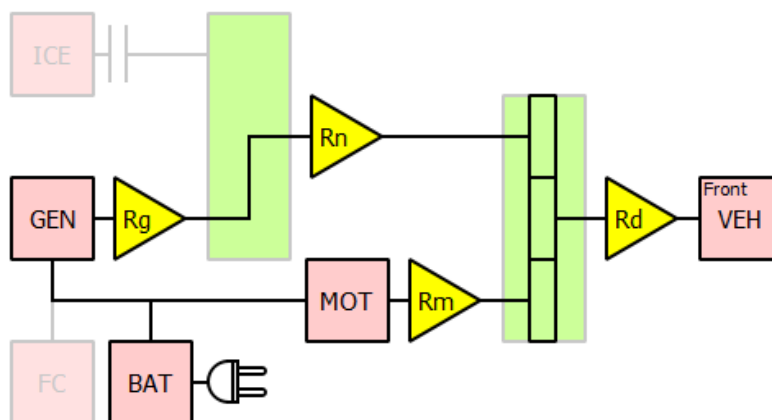
3.2.1.1 Architecture definition

Första steget i HOT var att definiera fordonets arkitektur, alltså hur drivsystemet är upplagt. Det innebär exempelvis motortyp, utväxling, eventuella batterier och bränsleceller. Här definierades också vilka motortyper som driver vilka hjul. Gränssnittet visas i figur 3.1 nedan. Blocken benämns enligt följande: *ICE* för förbränningsmotor, *GEN* för generator, *FC* för bränslecell, *BAT* för batteri, *MOT* för elmotor, *VEH* för fordon. Därtill fanns *Rg*, *Rn*, *Rm* och *Rd* som är olika positioner där det är möjligt att ha utväxling, antingen i bestämda förhållanden (gula trianglar) eller som växellåda (gula fyrkanter). De gröna lådorna benämner hur olika delar är kopplade till varandra, antingen direkt eller genom växel.

För de bilar som undersöktes med endast en elmotor (Tesla P85), användes alternativet “Electric” enligt figur 3.1. Därefter specificerades vilka hjul som drevs, samt om en växellåda avsågs att simuleras. Bilarna med flera elmotorer (Mercedes EQC och Tesla P100D) simulerades genom att välja alternativet “Dual electric” enligt figur 3.2. Blocken *MOT* och *GEN* fyller samma funktion trots olika namn. Generatoren kan utveckla vridmoment och motorn kan ladda batteriet, trots skilda benämningar.



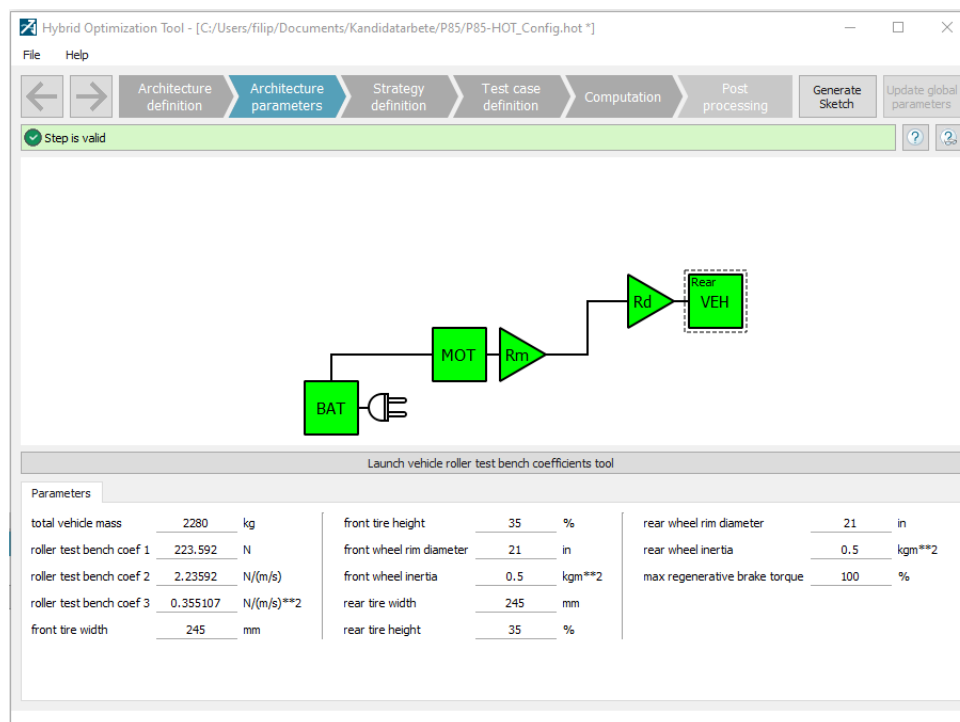
Figur 3.1: HOT - Definition av fordonets grundläggande uppbyggnad i HOT. Här visas arkitekturen “Electric”, som modellerar BEV med en motor.



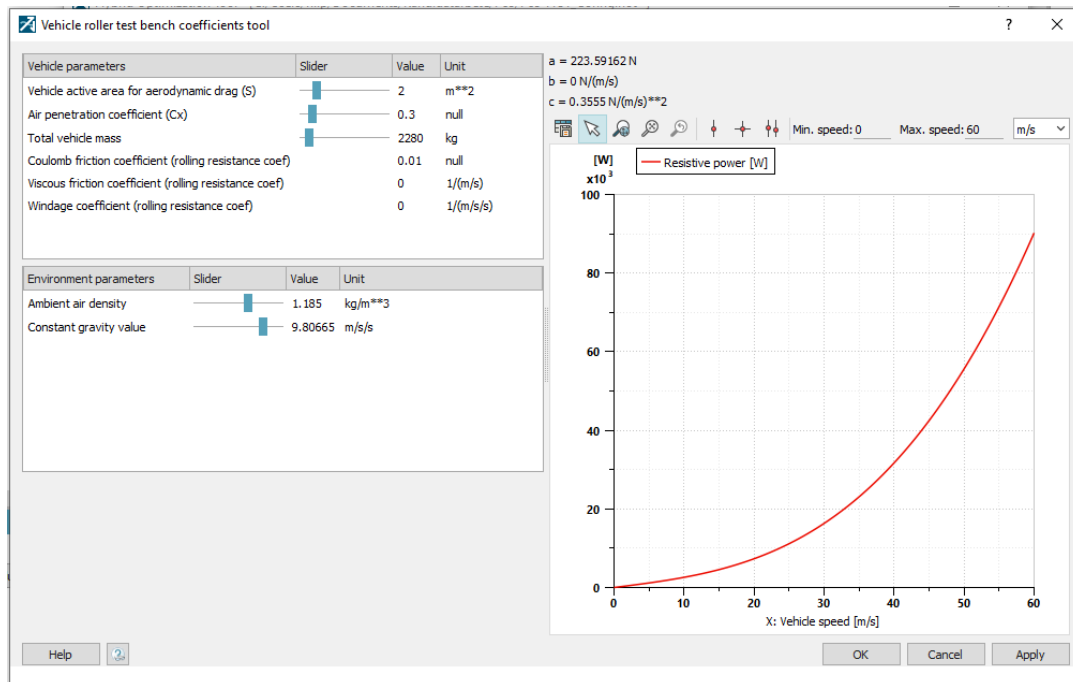
Figur 3.2: HOT - Arkitektur med dubbla elmotorer. Observera att GEN och MOT modelleras på samma sätt, endast benämningen skiljer.

3.2.1.2 Architecture parameters

Nästa steg i HOT var att specificera data om de komponenter som valts i föregående steg. Figur 3.3 nedan visar vilka parametrar angående fordonet som kunde anges. Genom verktyget *Vehicle roller test bench coefficients tool* beräknade HOT själv några av parametrarna, enligt Figur 3.4. Här angavs fordonets frontala tvärsnittsarea (A_f), luftmotståndskoefficienten sett rakt framifrån bilen (C_x), fordonets totala massa samt rullmotståndskoefficienter, såsom det är beskrivet i kapitel 2.1. Total massa beräknades i enlighet med tidigare diskussion i kapitel 2.1 som fordonets massa multiplicerat med en korrektionsfaktor δ .



Figur 3.3: HOT - Definition av fordonsdata. Här angavs parametrar såsom dess massa, information om däck, och ett beräknat rullmotstånd som togs fram med verktyget i figur 3.4.

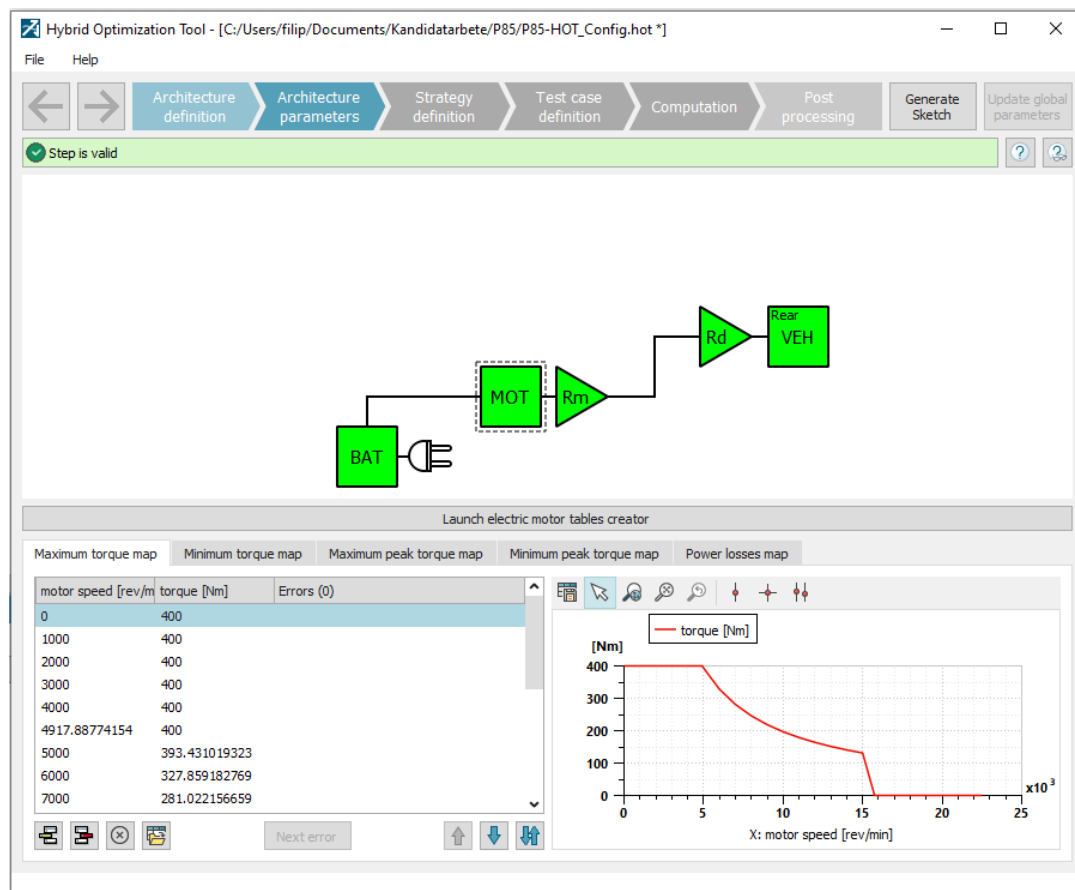


Figur 3.4: HOT - Vehicle roller test bench coefficients tool. Ett verktyg som tog fram de olika rullmotståndskoefficienterna som Amesim använder för att beräkna den totala motståndskraften hos fordonet.

Nästa steg var elmotorns parametrar, vilket visas i figur 3.5 nedan. Data för en elmotor med kända specifikationer kunde med fördel skapas med hjälp av verktyget “electric motor tables creator”, se figur 3.6.

I rutan “motor model” kunde olika typer av elmotorer väljas. Under första delen av projektet användes uteslutande den motortyp som angavs för varje modell. Sedan sattes parametrarna effekt och vridmoment. Eftersom tillverkare ofta publicerar sina “peak” värden används dessa, som i samma ruta delas med faktorn 1.5. Denna faktor bestämmer förhållandet mellan peak/kontinuerlig effekt/moment, och är ställbar några rader ner. Vidare i verktyget ställs maximalt varvtal, spänningsnivå och verkningsgrad in av användaren. Den antagna verkningsgraden beror på vilken typ av elektrisk elmotor som valts. Den verkningsgrad som presenteras i Amesim är ett grovt antagande beroende på motortyp. Detta används i projektet för att verkningsgraden skall vara framtagen på samma sätt för olika typer av elmotorer, något som blir viktigt senare när olika motortyper testas. De två raderna “Number of speed/torque values used for map generation” väljs till 60 respektive 60 enligt [13] för prestandasimuleringen, detta för att mappen över motorns verkningsgrad skall få en hög nivå på upplösningen.

3. Metod



Figur 3.5: HOT - Motorparametrar. Visar de vridmoments-mappar som har generats.

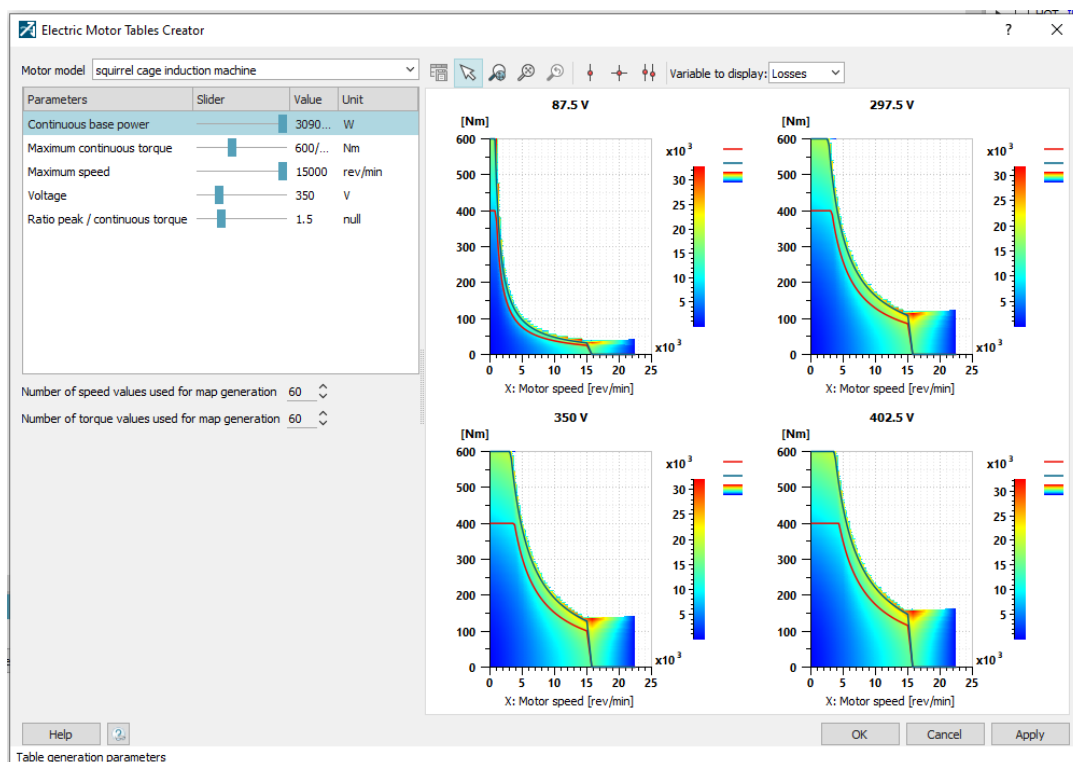
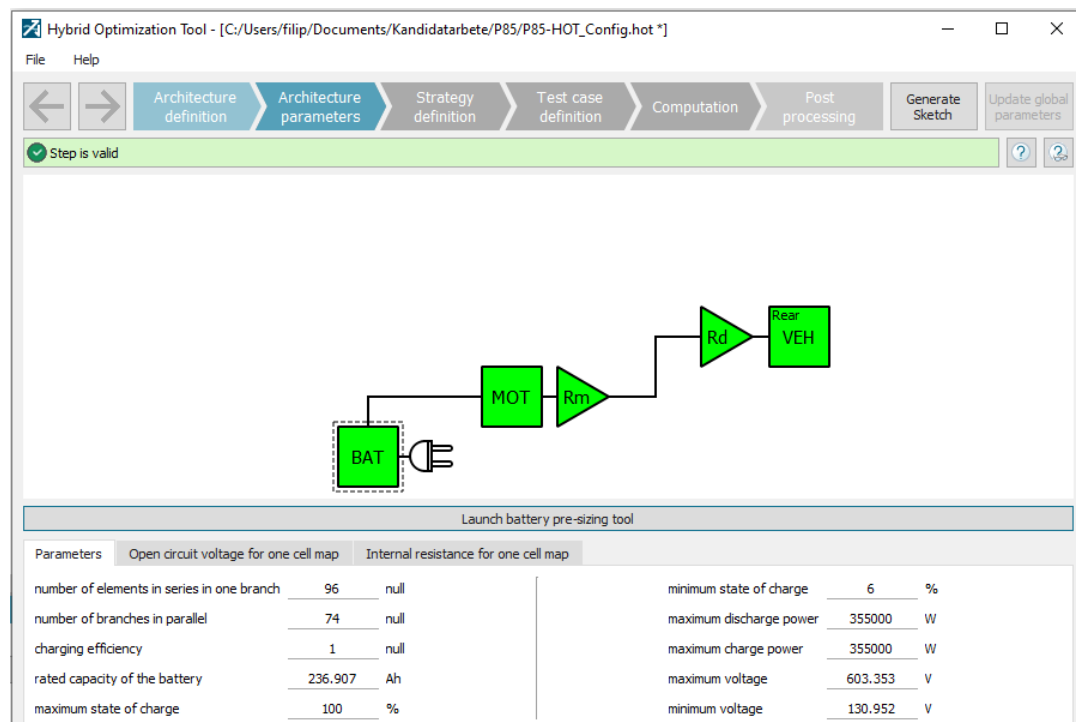


Figure 3.6: HOT - Electric motor creator tool, ett verktyg i HOT för att automatiskt generera motormappar efter några givna variabler såsom effekt, moment och motortyp.

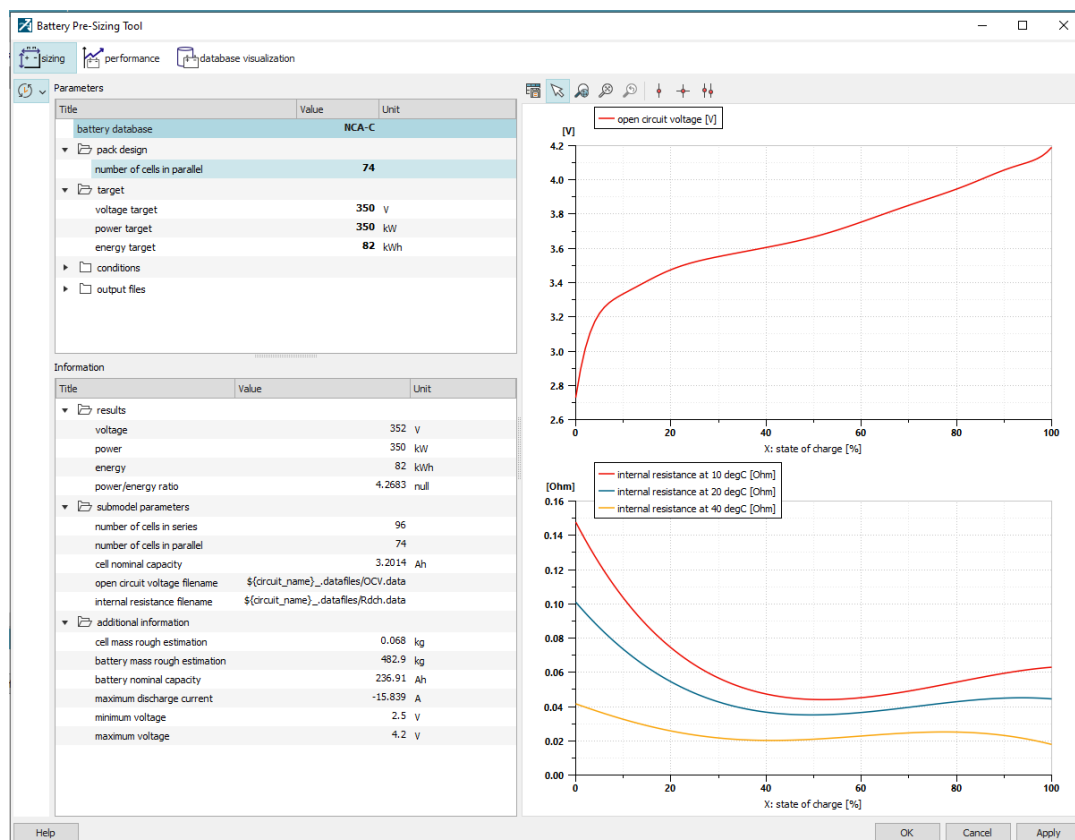
Slutligen specificerades batteriet och dess egenskaper, enligt figur 3.7. Parametrarna bestämdes lämpligen med verktyget “battery pre-sizing tool” som visas i figur 3.8. Här specificerades först typen av batteri under “battery database”, något som har inverkan på slutlig prestanda eftersom olika batterityper har olika egenskaper beroende på uppbyggnad och batterikemi. I elbilar används vanligtvis litiumbatterier med innehåll av Nickel, Kobolt och Aluminium oxider (NCA). I figur 3.8 visas några egenskaper för denna batterikonfiguration. Sedan angavs batteripackets struktur genom det antal celler som parallellkopplas, samt målvärden vad gäller spänning, kraft- och energiinnehåll.

Efter att battery pre-sizing tool använts har många parametrar automatiskt specificerats, men några återstår att ändra. “Maximum/Minimum state of charge” är designparametrar satta av tillverkaren för att skydda batteripacket mot överladdning och djup urladdning. För Tesla P85 räknar vi med “cut-off” (läs minimum SOC) vid 6% enligt [13], för Tesla P100D cut-off vid 4% enligt [16]. Vidare ändrades parametrarna “Maximum discharge power” och “Maximum charge power”. Den förstnämnda kan begränsa fordonets prestanda, isåfall kommer ett felmeddelande under simuleringen och siffran bör höjas. Den sistnämnda påverkar hur mycket batteriet kan laddas genom rekuperation eller från laddstation. Den siffra som visas i figur 3.7 är väl tilltagen för att resultatet inte ska kunna begränsas av denna faktor.

3. Metod



Figur 3.7: HOT - Batteriparametrar. Om verktyget battery pre-sizing tool används fylls detta i automatiskt. Maximum och minnum SOC samt maximum charge/di-charge power kan dock behöva ändras härifrån.



Figur 3.8: HOT - Battery Pre-Sizing Tool. Skapar ett batteripack av vald batteriteknik efter ett antal satta parametrar, t.ex. spänningsnivå och energiinnehåll.

3.2.1.3 Strategy definition

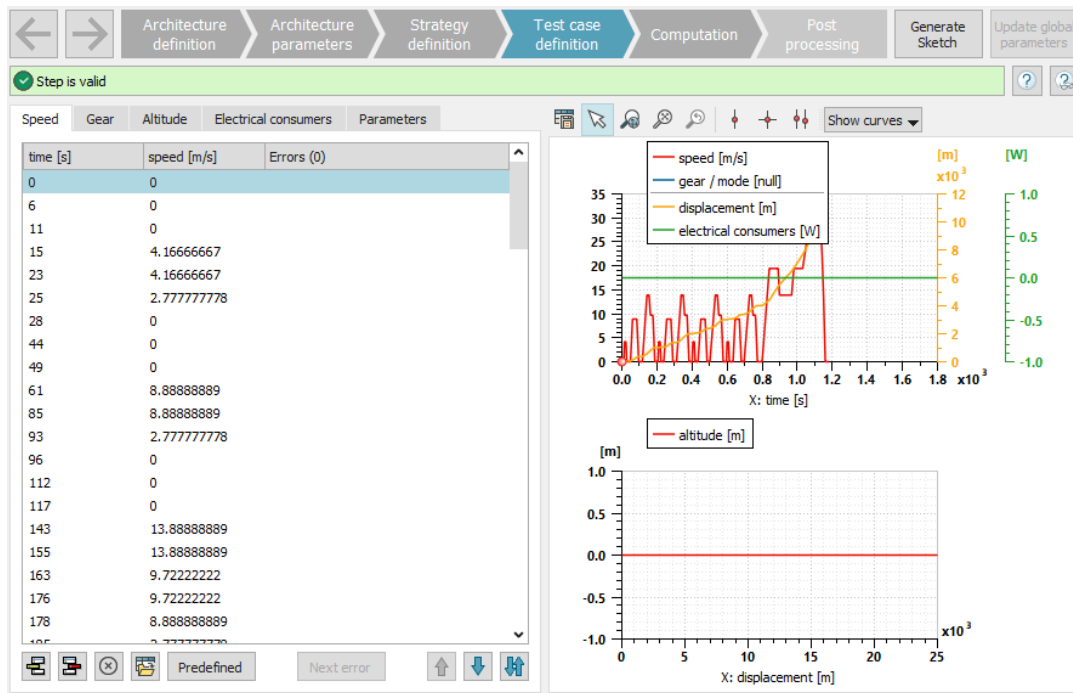
I “Strategy Definition” specificeras exempelvis strategier för start-stopp, växling och utväxling, användning av förbränningsmotor och batterihantering. Dessa alternativ används för optimering av exempelvis bränsleförbrukning, och är snarare inriktad mot fordon med förbränningsmotor eller hybrider, varför de lämnades tomma.

3.2.1.4 Test case definition

Vidare specificerades den körcykel som önskas simulera, antingen genom att välja en inbyggd i HOT eller genom att importera en textfil bestående av två kolumner, med tid [s] i första och hastighet [m/s] i andra. Efter att körcykeln valdes kunde utväxling väljas som funktion av tid, alternativt kan HOT beräkna bästa utväxling med avseende på minimal energikonsumtion genom alternativet “engaged gears: free”, eftersom fordonsarkitekturen för alla tre modeller definierats utan växellåda. Vidare bestämdes de höjdskillnader som det önskas, för projektet antogs att körningen sker på konstant plan mark. Efter det definierades elförbrukning av bilens extrautrustning (allt från lampor till air condition). Här valdes en konstant förbrukning på 100W enligt [5]. Slutligen specificerades inledande SOC (i början av simuleringen) och ett målvärde för SOC i slutet av körcykeln. För detta projekt sattes båda till 95%, anledningen till detta är att slutvärdet endast används för hybridfordon för att

3. Metod

bestämma om batteriet skall laddas, användas eller behålla konstant SOC. I figur 3.9 nedan visas test case definition delen ur HOT.



Figur 3.9: HOT - Test case definition. Här väljs körcykel och andra data som har med själva simuleringen att göra, såsom extra strömförbrukare och initial SOC.

3.2.1.5 Computation, Post processing

Post processing visar resultaten av simuleringen, se figur 3.10 samt ger möjlighet att skapa olika plottar baserad på olika parametrar som kan väljas till. I figur 3.11 visas körsträckan plottad mot simuleringstiden. Med hjälp av dessa kan relevanta siffror som räckvidden hos bilarna räknas ut. Detta redovisas senare under resultatet. Efter detta använder man "generate sketch" där man låter HOT generera en Amesim sketch. Detta gör det möjligt att nyttja hela Amesims bibliotek av funktioner för simulation och analys.

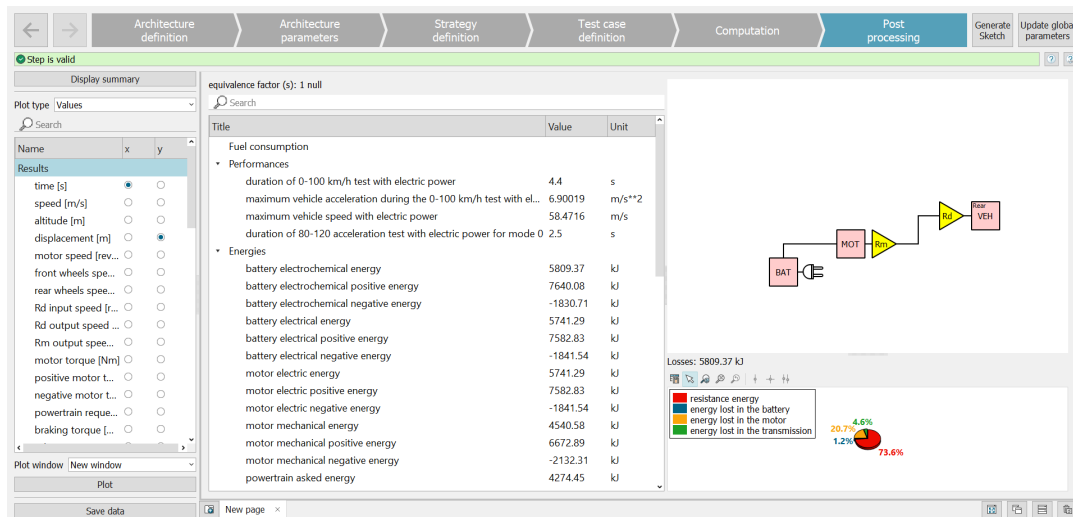


Figure 3.10: HOT - Display summary. Visar resultaten av simuleringen, energiflöden och prestanda.

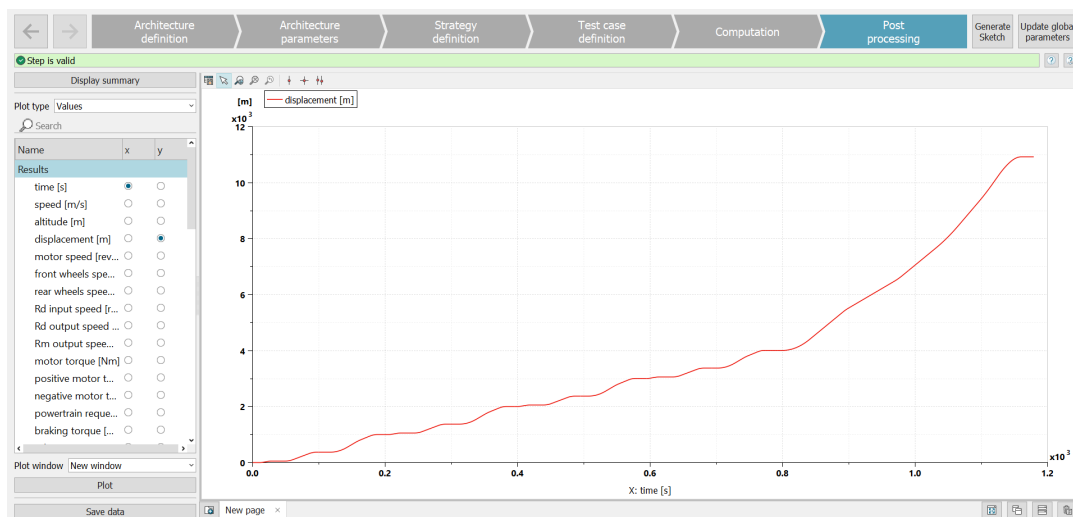
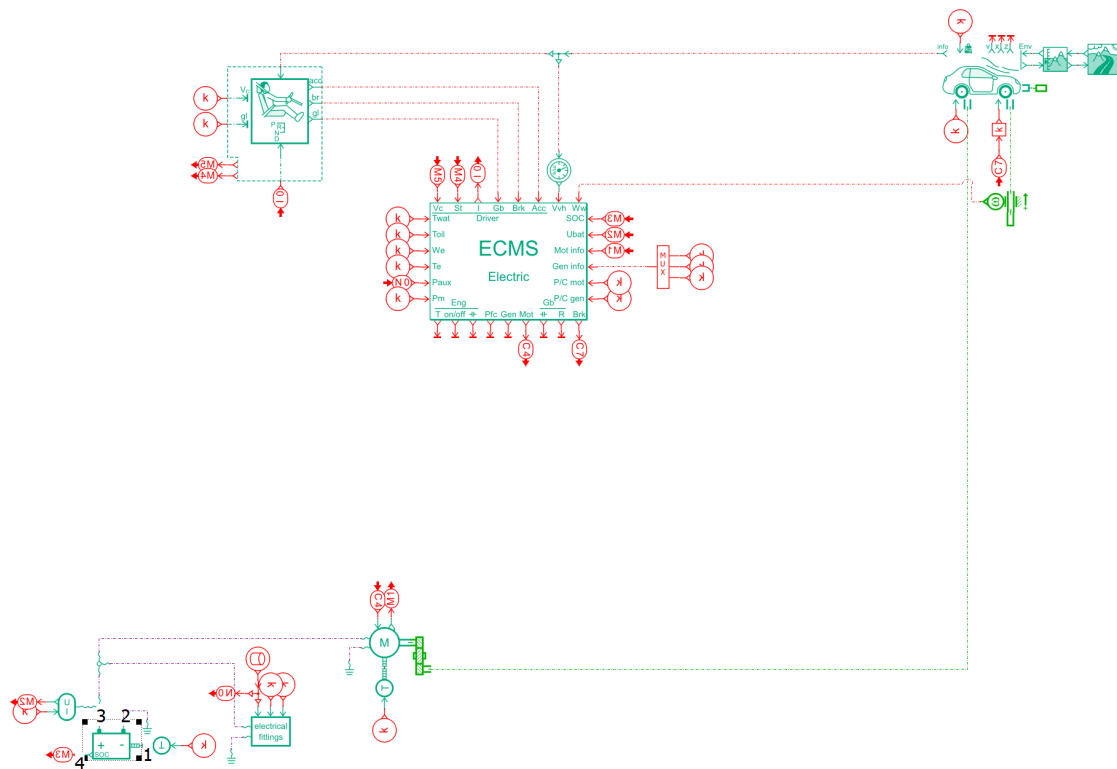


Figure 3.11: HOT - Displacement. Graf av sträcka färdad över tid.

3.3 WP3 - Förlustanalys

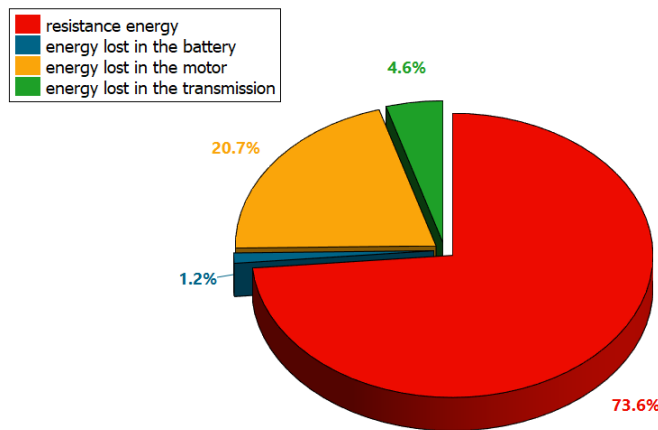
För att kunna optimera räckvidden i WP4 krävdes en förlustanalys. Genom att ta reda på var förluster i batteriet och motorn uppstår uppkommer möjligheten att reglera dessa förluster för en längre räckvidd. Förlustanalysen gjordes genom att låta HOT generera en sketch i Amesim, vilket visas i figur 3.12. Fördelen med att arbeta i en Amesim Sketch är ökad flexibilitet kring vilka ekvationer, plottar och verktyg som står till användarens förfogande. Efter en grundläggande analys i HOT vilket visas i figur 3.13 beslutades det kring vilka komponenter som skulle undersökas.



Figur 3.12: HOT genererar en komplett Amesim Sketch som modellerar fordonet efter satta parametrar i HOT. I figuren syns delar som motor och batteri i underkant, förare och fordon i överkant.

3.3.1 Förluster luft och rullmotståndet

Som beskrivet ovan är det figur 3.13 som ligger till grund för vilka förluster som skall undersökas ingående. Som tydligt visas är det “resistance energy” som använder klart mest energi. Detta är den del av energin som krävs för att överkomma det naturliga motstånd som uppstår enligt ekvationer (2.1) till (2.4), och innefattar luftmotstånd och rullmotstånd. För att kunna dela denna energi i mindre delar användes Siemens Amesims parametrar såsom Faero@vehicle (aerodynamiska motståndet), Froll@vehicle (rullmotståndet) och disp@vehicle (distansen). Detta är de parametrar som ligger bakom figur 3.13, och hjälper till att förstå vilka delar av fordonet som påverkar energiåtgången. Det som gjordes var att analysera hur stor påverkan som dessa olika delbidrag har.



Figur 3.13: Postprocessing i HOT visar översiktligt vilka energiförluster som påverkar fordonet, och till hur stor del.

$$E_{aero} = \int F_{aero} dt \quad (3.1)$$

$$E_{roll} = \int F_{roll} dt \quad (3.2)$$

3.3.2 Förluster i motorn

Förlusterna i motorn analyserades genom Amesims verktyg Post Processing. För att kunna analysera hur mycket energi som förloras i motorn behövdes ekvation (3.3). Detta ger den totala energin som förlorats och blir därför en värdefull parameter för att jämföra olika simulationer med varandra. Detta värde påverkas dock av vilken körsträcka som simulerats. Det gör att det inte går att jämföra mellan olika körcykler. För detta användes ekvation (3.4), där energiförlusterna i motorn är utslagna på körsträckan.

$$E_{loss,motor} = \int P_{loss,motor} dt \quad (3.3)$$

$$E_{loss,motor,distans} = \frac{E_{loss,motor}}{disp@vehicle} \quad (3.4)$$

3.3.3 Förluster i batteriet

När förlusterna i batteriet skall analyseras är tillvägagångssättet att precis som för motorn utgå ifrån de parametrar som Amesim presenterar vid simulering. Det första som gjordes är att summera energin som förlorats i batteriet med hjälp av ekvation (3.5). Detta är den totala energin som förlorats i batteriet. Sedan analyserades också den totala energin som batteriet levererat genom flera ekvationer. Först i ekvation (3.6). Där beräknas effekten batteriet levererar ut, inkl den effekten som blir av regenerativ bromsning. Därefter räknades den totala energin som levererats från batteriet ut med ekvation (3.7). Precis som för analysen av motorns förluster behöver energin divideras med körcykelns längd. Detta görs i (3.8).

$$E_{loss,battery} = \int P_{loss,battery} dt \quad (3.5)$$

$$P_{battery} = V_{battery} * I_{battery} \quad (3.6)$$

$$E_{total} = \int Power_B dt + \int E_{loss,battery} dt \quad (3.7)$$

$$E_{distans} = \frac{Power_B}{disp@vehicle} \quad (3.8)$$

3.4 WP4 - Optimering

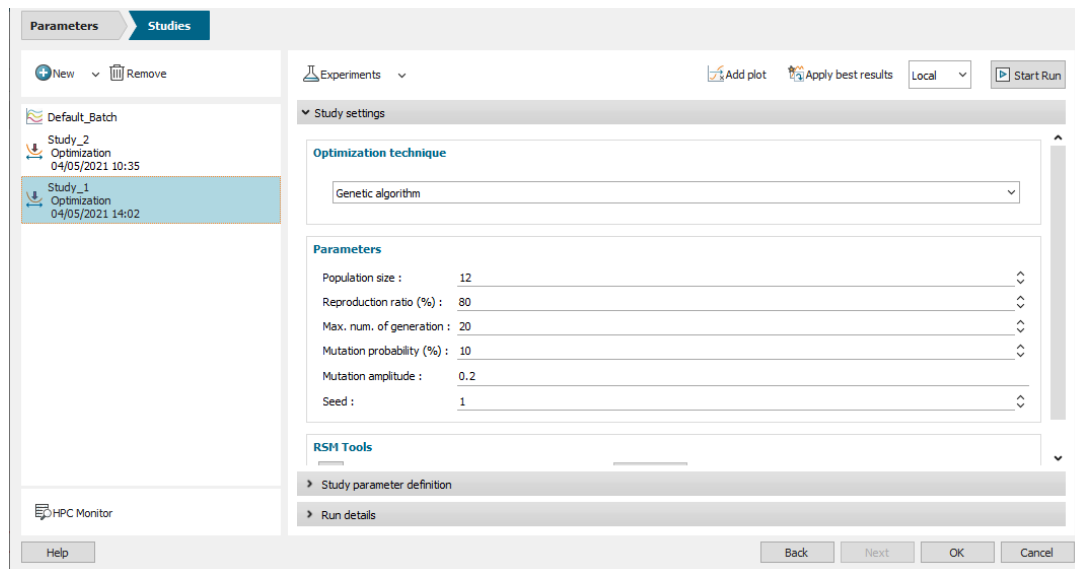
När de olika energiflödena i bilen analyserats skall de försöka minimeras för att uppnå största räckviddsförbättring. Detta gjordes till största del genom Amesims inbyggda optimeringsverktyg, men för vissa komponenter analyserades istället ekvationer och energiflöden och ett manuellt test gjordes, detta på grund av begränsningar i verktyget. Begränsningarna är när det skall ändras typ av komponenter, study manager har endast möjlighet att testa parametrar därför görs denna typ av undersökningar manuellt. Eftersom många parametrar undersöktes togs beslutet att endast genomföra alla optimeringar på Tesla Model S P85. Lyckade optimeringar applicerades sedan på de övriga modellerna. De olika fordonen är uppbyggda med liknande modeller och endast olika parametrar, därför borde de olika resultaten och trenderna av optimeringen vara antingen snarlika eller identiska för samtliga fordon.

3.4.1 Study manager

Study manager är det verktyg som finns inbyggt i Amesim för att göra optimeringar. Det första som gjordes var att specificera de parametrar som behövs. I detta steg är det även möjligt att skapa ekvationer och matematiska uttryck för mer komplexa analyser.

När parametrarna bestämts så är nästa steg att bestämma vilken optimeringsalgoritm som skall användas. I detta projekt användes "Genetic algorithm", istället för "NLPQL". Anledningen till detta var hur licenserna i Amesim fungerar. Antalet licenser är begränsade för Chalmers, och vid optimering används många licenser av en användare. Problemet med "NLPQL" är att om licenserna tar slut under en körning stannar körningen och det presenteras inget resultat. "Genetic algorithm" försätter istället simuleringen vilket gör det möjligt att få ett resultat och då båda alternativen presenterade lika resultat när de gick färdigt valdes därför det mer tillförlitliga alternativet.

De parametrar som användes vid optimering var en populationsstorlek på 12 individer, och antal generationer sattes till 20 st. Resterande alternativ valdes till study managers standardvärden, dessa visas i sin helhet i figur 3.14. Att antal individer valdes till 12 st beror på licensproblemet beskrivet ovan. Detta var ett antal som vid de flesta körningar kunde gå utan att licenserna tog slut, och om det hände var det få individer som påverkades.



Figur 3.14: Amesim - Optimering. Valda parametrar för att köra en optimering baserad på Genetic Algorithm.

3.4.2 Batteri

Batteriet var en av de komponenterna som valdes att försöka optimeras för minskad förbrukning. De två parametrarna som valdes att undersöka var celltyp och temperatur.

3.4.2.1 Celltyp

När celltypens påverkan testades valdes metoden att manuellt testa de fyra olika typerna som finns tillgängliga i "Battery presizing tool". Dessa fyra är "cylindrical LFP-C", "prismatic LFP-C", "NCA-C" och "NMC-C". För att endast undersöka celltypen konfigurerades batteriet så spänning, energikapacitet och effektmålet var samma som för det ursprungliga. Därefter kördes en simulering med de fyra aktuella körcyklerna efter varandra och förlusterna kontrollerades enligt ekvation (3.4)-(3.5) samt även den beräknade räckvidden. Därefter kördes även en förlängd WLTC kör-cykel för att observera vad som händer när SOC minskar. Sedan reciterades detta för de fyra olika typerna och den bästa typen valdes till fortsatt simulering.

3.4.2.2 Temperatur

För optimering av drifttemperatur valdes det istället att använda study manager för att hitta en optimal temperatur. Den ingående parametern som valdes var batteritemperatur $T_{batteri}$ och parametern som skulle minskas var resultatet av ekvation (3.5). Värden som temperaturen skulle variera mellan sattes från -10°C till 50°C eftersom det ansågs vara rimliga värdena att uppnå med avseende på utetemperatur och batteriets normala drifttemperatur.

3.4.3 Motor

Motorn är den komponenter som bidrar till störst energiförlust och det är därför en bra komponent att försöka minska förlusterna i. De två aspekterna som testades var att byta mellan de olika typerna av elektriska motorer som Amesim stödjer i “Electric Motor Tables Creator”.

3.4.3.1 Motortyp

De fyra olika motortyperna som finns tillgängliga är “interior permanent magnet synchronous machine”, “interior perm. magnet synch. machine (flux concentration)”, “squirrel cage induction machine” och “wound rotor induction machine”. Dessa fyra testades manuellt genom att ändra motortyp och köra en simulering med samma typ alla fyra körcykler efter varandra. Där undersöktes skillnaden i SOC, samt resultatet av ekvation (3.3). Detta användes sedan till att utvärdera vilken motortyp som var mest effektiv. Det gjordes också en simulering med HOT för att analysera hur prestandan påverkades.

3.4.3.2 Utväxling

I steget ovan framkom det att de två typerna av permanentmagnetmotorer gav samma resultat. Samma fenomen observerades även för de två varianter av induktionsmotor. Detta gjorde att en “squirrel cage induction machine” och en “interior permanent magnet synchronous machine” användes för att undersöka hur utväxlingen påverkar energiåtgången. Detta borde enligt teorin ge en stor påverkan då effektiviteten varierar beroende på varvtal och vridmoment, vilket ändras när utväxlingen ändrades för bilen. Detta gjordes genom att använda optimeringsverktyget study manager och låta utväxlingen variera mellan 1:1 och 20:1. Sedan kördes optimeringen för de båda motormodellerna och ett optimalt värde togs fram. Därefter valdes det att köra en räckviddssimulering med värdena för att kontrollera att det gav en längre räckvidd. Det kördes även en prestandasimulering i HOT för att undersöka hur detta påverkades av den nya valda utväxlingen.

3.4.4 Bilens motstånd

Bilens motstånd är fördelade enligt ekvationerna (2.1) till (2.4). De motstånd som valdes att försöka förbättra är F_{rull} och F_{aero} .

3.4.4.1 Luftmotstånd

Gällande luftmotståndet är det frontarean A_f och koefficienten C_D som påverkar storleken på detta. Det gjordes inte något försök att skapa en effektivare geometrisk form för fordonen. Men under arbetets gång uppdaterade Tesla specifikationen på Model S med en sänkning av C_D från 0.24 till 0.208 [22]. Detta värde implementerades som en förbättring men är också den ända förbättringen av luftmotståndet som gjorts.

3.4.4.2 Däckbredd

För att undersöka däckbreddens inverkan på räckvidden användes “study manager”. Däckbredden varierades mellan 50 mm till 550 mm och batteriåtgången för en cykel bestående av de fyra kör cyklarna efter varandra minimerades. Fram och bakdäcken varierades oberoende av varandra då de definierades som olika variabler i Amesim.

4

Resultat

Detta avsnitt presenterar resultaten från varje Work Package. Först redovisas den information som hittades för varje bilmodell, sedan resultatet av prestanda- och förlustsimuleringarna. I de sista stegen diskuteras vilka optimeringsalternativ som finns och påverkan av dessa optimeringar på prestanda och räckvidden.

4.1 WP1 - Informationsinhämtning

Informationen som inhämtades i WP1 presenteras i sin helhet i appendix A, B och C för respektive bilmodell P85, P100 och EQC400. Räckvidden för de olika körcyklerna presenteras i tabell 4.1 nedan. Som presenterat finns ingen räckvidd för Teslas bilar enligt WLTC. Detta beror på att de typgodkändes innan WLTC introducerats. Mercedes EQC har däremot testats enligt båda körcyklerna. Den prestanda som biltillverkarna uppger för modellerna visas i tabell 4.2. Mer detaljerade information om bilarnas egenskaper och de parametrar som behövs för att genomföra simuleringar och validera resultaten framgår i appendix A, B och C.

Tabell 4.1: Inhämtad information om räckvidd i kilometer

Körcykel	P85	P100	Mercedes EQC 400
NEDC	502	613	450
WLTC	N/A	N/A	407

Tabell 4.2: Prestanda enligt tillverkaren

Kategori	P85	P100	MercedesEQC400	Enhet
Toppfart	210	250	180	[km/h]
Acceleration från 0-100 km/h	4.4	2.7	5.1	[s]

4.2 WP2 - Prestandasimulering

Den räckvidd som kalkylerats efter simuleringarna visas i tabell 4.3. Prestandasimuleringarna som gjorts med hjälp av HOT visas i figur 4.4. Detta är både accelerationssiffror och siffror på den toppfart som HOT presenterar. Det noteras skillnader mellan de simulerade värdena och de egentliga värdena givna av tillverkarna.

Tabell 4.3: Simulerad räckvidd i kilometer

Körcykel	P85	P100	Mercedes EQC 400
NEDC	538	600	421.4
WLTC	469.4	543.4	374.9
FTP75	557.3	615.3	439.1
NYCC	537.8	566.9	419.3
WLTC + NEDC + FTP75 + NYCC	546.67	626.54	426.63

Tabell 4.4: Simulerad prestanda

Kategori	P85	P100	Mercedes EQC 400	Enhet
Toppfart	210.5	264	192.8	[km/h]
Acceleration från 0-100km/h	4.4	2.9	4.5	[s]

4.3 WP3 - Förlustanalys

Bland de resultat som simuleringen ger finns energiförluster i olika delar av bilen. En del av projektet är att undersöka dessa förluster och dess påverkan på bilens prestanda. Alltså hur mycket minskningen av förlusterna påverkar räckvidden. De förluster som undersöktes var de som endast är kopplade till bilen och kan optimeras bortsett från externa faktorer som till exempel förare. Battericellteknik, luftmotståndskoefficienten C_D , utväxling, motor och värmeförluster är vad som undersöktes.

C_D för både P85 och P100D ligger på 0.24 [14]. Luftmotståndet kan endast undersökas i Amesim och är inget som kan optimeras genom simuleringarna utan den är en faktor som ändras beroende på bilens frontalarea och design. För att uppskatta C_D -faktorers påverkan användes en uppdaterad C_D -faktor från nya Tesla-modeller, $C_D = 0.208$ [22]. Motståndsensenergin presenteras i tabell 4.5. Energiförluster i motor och batteri som förekommer på grund av energiomvandlingen och verkningsgraden redovisas i tabell 4.6 och 4.7.

4.3.1 Motståndsensenergi

Tabell 4.5: Energiåtgång för rullmotstånd och luftmotstånd för körcykelkombinationen WLTC+NEDC+FTP75+NYCC

Förluster	P85	P100D	Mercedes EQC 400	Enhet
E_{roll}	983898	1201430	1117140	[J]
E_{aero}	314903	315015	336931	[J]

4.3.2 Förluster i motor

Tabell 4.6: Förluster i motor för WLTC+NEDC+FTP75+NYCC

Förluster	P85	P100D	Mercedes EQC 400	Enhet
$E_{loss,motor}$	8993580	9147700	10641300	[J]
$\frac{E_{loss,motor}}{distans}$	166.97	169.69	196.964	[J/m]

4.3.3 Förluster i batteri och totalt

Tabell 4.7: Förluster i batteri för WLTC+NEDC+FTP75+NYCC

Förluster	P85	P100	Mercedes EQC 400	Enhet
$E_{loss,batteri}$	379882	344477	277344	[J]
E_{total}	30263400	34484300	34101100	[J]
$\frac{E_{total}}{distans}$	561.856	639.67	631.195	[J/m]

4.4 WP4 - Optimeringsscenarion

Nedan presenteras optimeringar för minskad energiförlust och därmed ökad räckvidd. Resultaten presenteras först i detalj, individuellt för varje komponent som förbättrats. Därefter visas en sammanställning över vad resultatet blir om alla förbättringar appliceras samtidigt och därmed också den maximala räckvidden som uppnåtts.

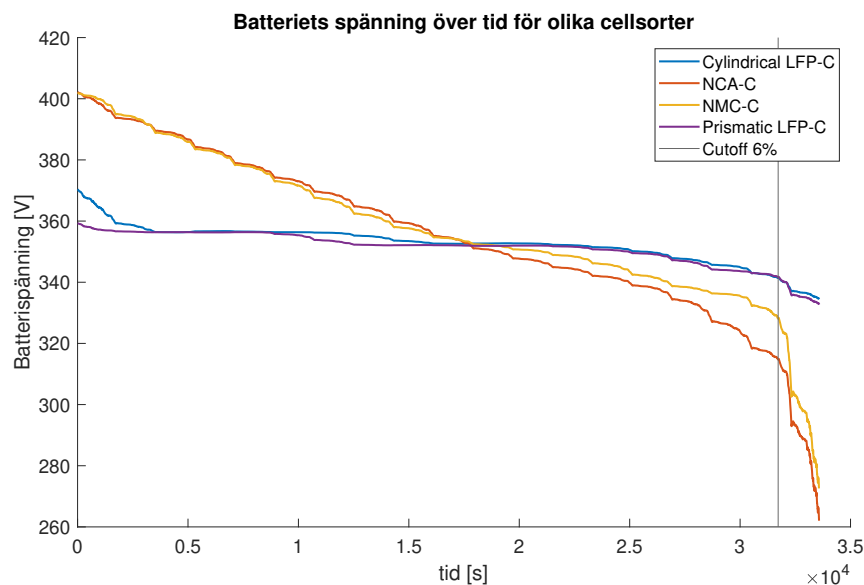
4.4.1 Batteriteknik

Cellteknikens påverkan varierades för en Tesla Model S P85 mellan de fyra inbyggda i battery pre-sizing tool, som beskrivet i 3.2.1.2 samt i figur 3.8, med övriga parametrar konstanta observerades flera resultat. I tabell 4.8 observeras att räckvidden ej påverkades nämnvärt för de olika celltyperna. Vidare noteras att batteriets och motorns verkningsgrad endast ändrades marginellt men att energiförlusterna i batteriet för NCA-C celler var betydligt högre än för de övriga cellteknikerna. Däremot är batteriförlusterna för samtliga en storleksordning mindre än förlusterna i motorn vilket är i linje med resultatet från tabell 4.8. Det ska tilläggas att batteriernas energinivå ej är konstant trots att den specificerades så i HOT.

Tabell 4.8: Tabell som visar skillnaden för olika batteritekniker

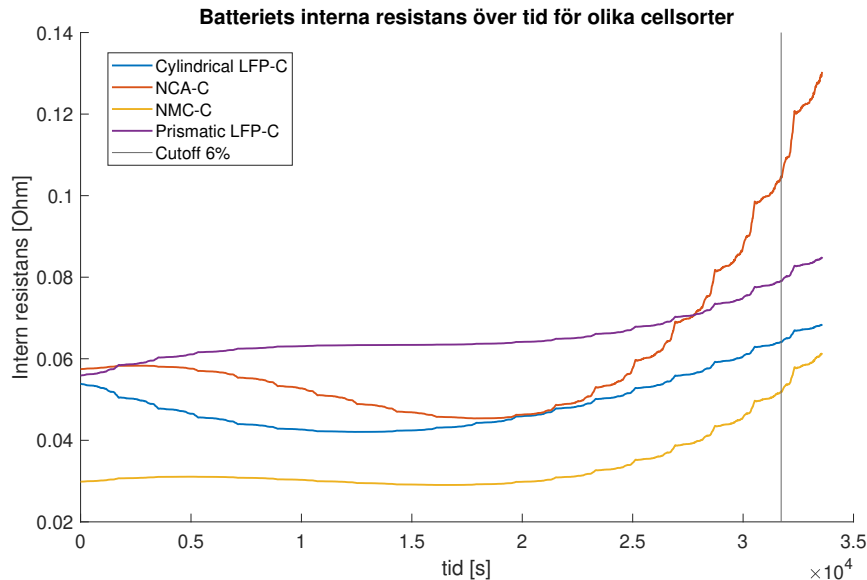
Räckvidd och förluster för olika celltekniker					Enhet
Cellteknik	Cyl. LFP-C	Pris. LFP-C	NCA-C	NMC-C	
Räckvidd	404.3	404.4	407.2	406.1	km
Energiförluster i batteriet per km	42.57	54.94	120.26	50.36	kJ/km
Energiförluster i motorn per km	582.20	582.06	578.05	579.62	kJ/km
Motorns medelverkningsgrad	81.07	81.07	80.90	81.06	%
Batteriets medelverkningsgrad	98.775	98.425	96.71	98.55	%
Energi i batteriet	820379	825380	852255	823737	kJ

I figur 4.1 visas hur spänningen för de olika batterierna påverkas av SOC. Det observeras att batteriernas spänning minskar kraftigt för SOC under cutoff som för Tesla P85 är 6%. Vidare noteras att LFP-C cellerna har liknande mönster samt att NCA-C och NMC-C också är nästan identiska. Vidare ser vi att LFP-C cellerna börjar vid en högre spänning men tappar strax innan cutoff som för P85 är vid 6% SOC. I jämförelse har NCA-C och NMC-C en stabilare spänningsnivå genom hela SOC intervallet.



Figur 4.1: Batteriets spänning för olika celltekniker med samma kapacitet. Detta för en Tesla P85 som kör WLTC cykeln upprepade gånger med ett fulladdat batteri tills det är slut. Vi ser att LFP-C cellerna har liknande mönster samt att NCA-C och NMC-C också är nästan identiska. Vidare ser vi att LFP-C cellerna börjar vid en högre spänning men tappar strax innan cutoff som för P85 är vid 6% SOC. I jämförelse har NCA-C och NMC-C en stabilare spänningsnivå genom hela SOC intervallet.

Från figur 4.2 utläses de olika interna resistanserna för batterierna som samtliga har olika form. I denna upställningen kan de variera upp till 100% beroende på hur mycket SOC batteriet har.

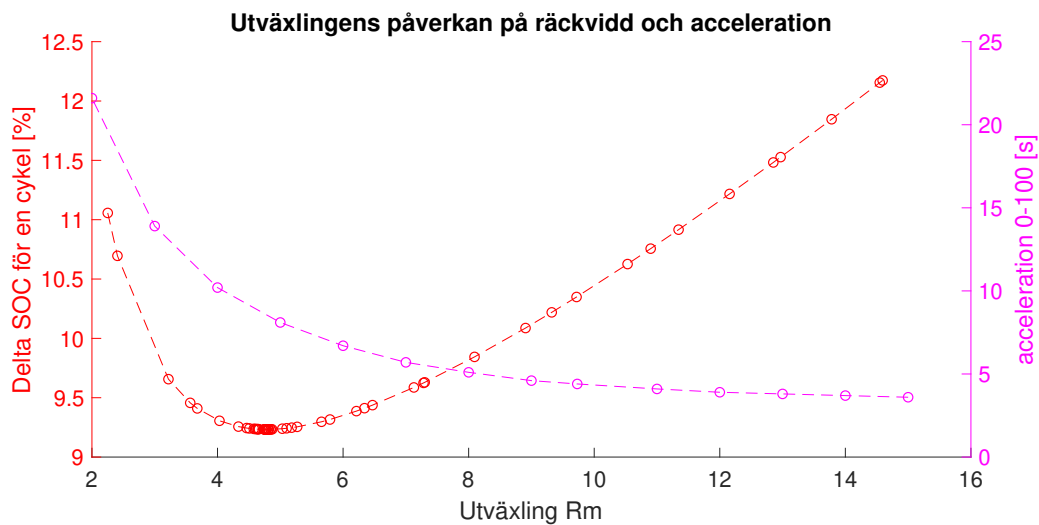


Figur 4.2: Batteriets interna resistans för olika celltekniker med samma kapacitet. Detta för en Tesla P85 som kör WLTC cykeln upprepade gånger med ett fulladdat batteri tills SOC nått 0%. Det noteras att samtliga ökar kraftigt för låga SOC vilket uppnås efter lång tids körning, alltså till höger i grafen. NMC-C verkar ha lägst intern resistans medan prismatic LFP-C har högst genom majoriteten av SOC intervallet. Vidare observeras att sambanden som noterades i figur 4.1 ej kan ses här.

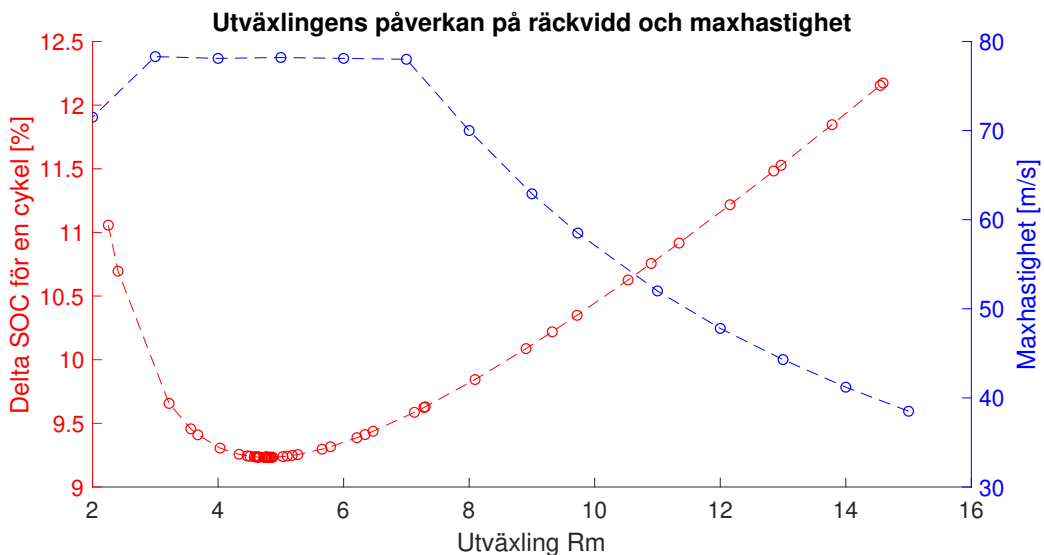
4.4.2 Utväxling

Då utväxlingen R_m optimeras med avseende på räckvidd noteras flera intressanta resultat. Det noteras i figurerna 4.3 och 4.4 att batterikapaciteten som krävdes för att köra en körcykel bestående av de fyra körcyklerna på varandra följande, då dessa optimerades med study manager som är beskrivet i 3.4, minimerades för $R_m = 4.77$ för Tesla P85, vilket resulterade i en 15% förbättring av räckvidden.

Räckviddsoptimeringen innebär en prestandaförlust som kvantifieras av tiden det tar för fordonet att accelerera från 0 till 100 km/h i sekunder samt fordonets maxhastighet. I figurerna 4.3 och 4.4 visas relationen mellan utväxlingen, SOC för en körcykel, acceleration och max hastigheten. Från figur 4.3 utläses att accelerationen ökar, eller ekvivalent att tiden som krävs för att accelerera från 0 till 100 km/h minskar, för högre utväxlingar R_m . Ett annat sätt att beskriva detta är att då varje rotation i hjulen kräver fler rotationer i motorn ökar accelerationen. Dessutom visar figur 4.4 att maxhastigheten minskar för ökande R_m vilket leder till att motorns maxvarvtal uppnås snabbare när utväxlingen ökar. Vidare noteras att ökningen av maxhastigheten stannar av för $R_m < 7$, med undantag för $R_m = 2$.



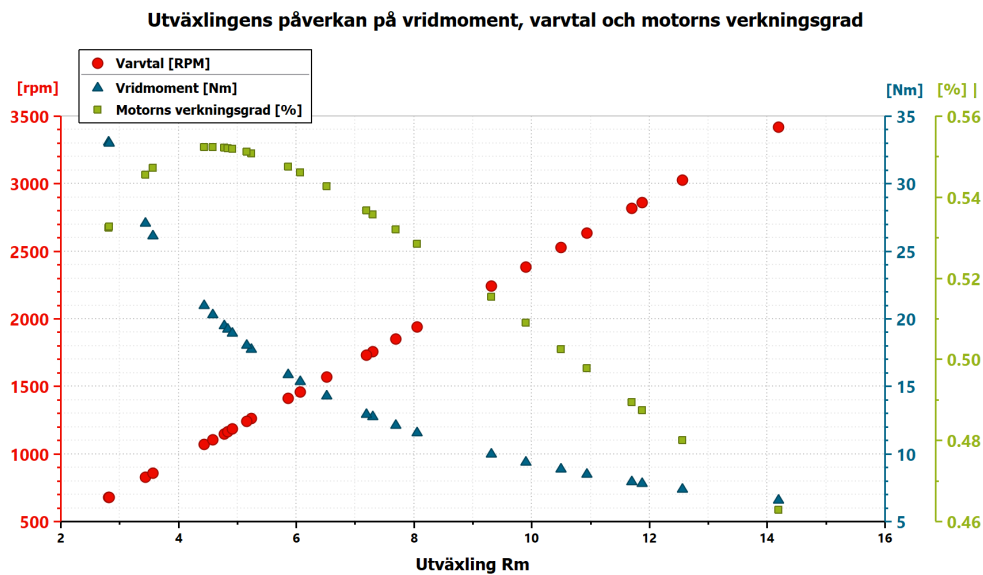
Figur 4.3: Utväxlingen R_m påverkan på räckvidden och accelerationen för Tesla P85. Verktöget study manager som är beskrivet i 3.4 användes för att med en algoritm optimera utväxlingen så att batteriåtgången (delta SOC) skulle minimeras för en körcykel, vilket är ekvivalent med att räckvidden maximeras. Utväxlingens påverkan på accelerationen togs fram manuellt för 14 olika mätpunkter. Det noteras att accelerationen blir högre för högre utväxlingar medan räckvidden maximeras för $R_m = 4.77$.



Figur 4.4: Utväxlingen R_m påverkan på räckvidden och maxhastigheten för Tesla P85. Batteriåtgången togs fram på samma sätt som står beskrivet i figur 4.3. Utväxlingens påverkan på maxhastigheten togs fram manuellt i HOT. Grafen visar att maxhastigheten generellt ökar för lägre utväxling men att ökningen stannar av vid $R_m \approx 7$ och lägre.

I och med att motorns verkningsgrad är en funktion av vridmoment och varvtal, som beskrivet i figur 2.6, undersöktes även detta samband. I figur 4.5 visas hur verknings-

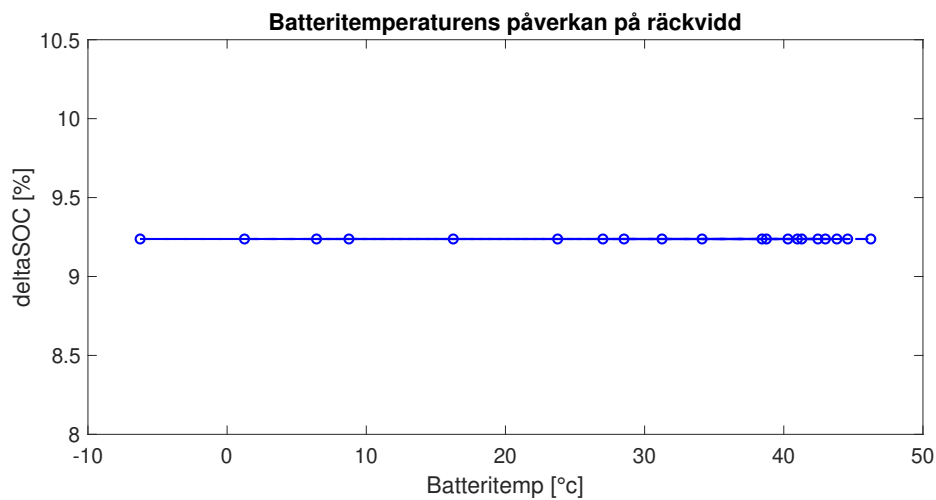
graden, vridmomentet och varvtalet påverkas av olika utväxlingar för samma körcykel som användes ovan. Här har medelvärdet av dessa storheter beräknats i Amesim vilket innebär att den tid fordonet stått stilla också beräknas vilket i sin tur ger ett mycket mindre värde. Däremot ska trenderna vara densamma då samma körcykel kördes varje gång. Det noteras att verkningsgradens maximum uppnås vid samma R_m som räckvidden vilket skulle antyda att det är denna som har optimerats. Vidare noteras att varvtalen och vridmomenten varierar för de olika utväxlingarna vilket innebär att verkningsgraden ändras beroende på var i mappen i figur 2.6 den hamnar. Detta för Tesla P85 med Amesims inbyggda motormapp för en asynkronmotor med samma motorparametrar som P85.



Figur 4.5: Utväxlingen R_m påverkan på motors verkningsgrad, vridmoment och varvtal då den optimerades för att minimera batteriåtgången. Det framkommer att högsta verkningsgrad korresponderar med minskad batteriåtgång och längsta räckvidden enligt figurerna 4.3 och 4.4, dvs $R_m = 4.77$

4.4.3 Temperatur

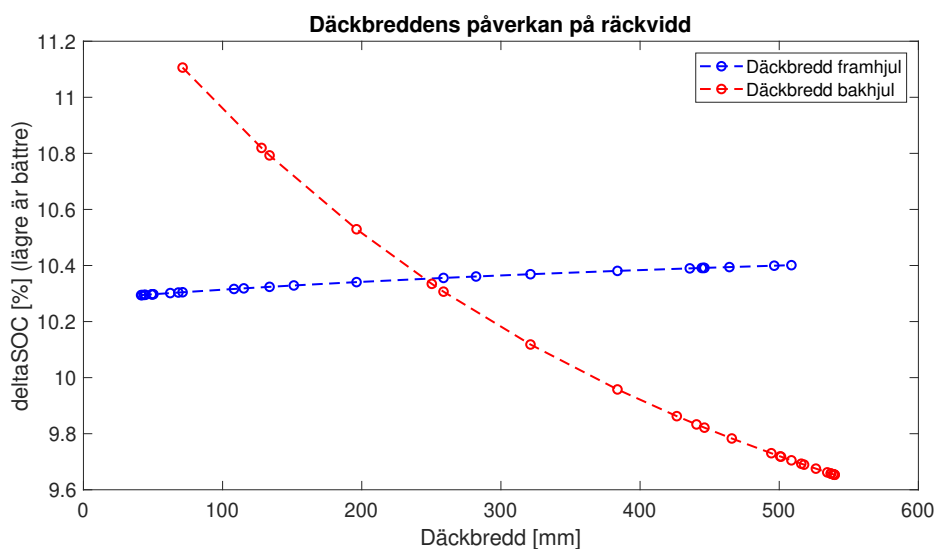
Enligt de utförda simuleringar som har utförts med syfte att optimera modellerna är räckvidden konstant då batteri- och motortemperaturen varierar. Batteritemperaturens påverkan på batteriåtgången för en cykel kan ses i figur 4.6. Samma figur erhöles då motortemperaturen varierades och för samtliga fordon. Notera att det inte finns möjlighet att undersöka temperaturens inverkan på batteriet och motors livslängd då detta ej simuleras.



Figur 4.6: Batteriåtgången som krävdes för att köra en körcykel bestående av de fyra olika cyklarna (NEDC, WLTC, FTP75, NYCC) på varandra följande. Det noteras att den förblir konstant och att räckvidden därmed är konstant, dvs inget samband finns i modellen för P85. Samma resultat erhöles för de övriga fordonen.

4.4.4 Däckbredd

En annan variabel som kan tänkas påverka räckvidden hos de olika fordonen är däckbredden. Då denna undersöktes och optimerades i “study manager” 3.4 kunde resultatet i figur 4.7 erhållas. Där har däckbredder mellan 50 mm till 550 mm undersökts med avseende på batteriåtgången för en cykel. Det verkar finnas olika samband för fram respektive bakhjulen där framhjulen får en marginellt lägre förbrukning då smalare däck används medan bakhjulen har markant större förbrukning för däck med mindre bredd.



Figur 4.7: Däckbreddens påverkan på energiförbrukningen för en körcykel. Det noteras att bak och framhjulen påverkar energiförbrukningen olika. Smala bakdäck ger högre förbrukning och kortare räckvidd medan smala framdäck ger aningen lägre förbrukning och längre räckvidd.

4.4.5 Efter optimering

Nedan visas resultatet av förlustenergierna efter optimering, tabell 4.9 visar en översikt över vilka räckviddsförbättringar som åstadkommits när alla individuella förbättringar slagits samman till en modell. Tabell 4.10 visar skillnaden i förbrukning och räckvidd i procent, hur stor del den nya förbrukningen är av den gamla. Det visas också hur många procent längre den nya räckvidden är jämfört med den tidigare, detta för att enkelt kunna jämföra med målet på 10% som fanns i början av projektet.

Tabell 4.9: Resultat av optimering

Simulering, räckvidd och förbrukning							
	Modeller innan optimering			Modeller efter optimering			
Körcykler	P85	P100D	EQC	P85	P100D	EQC	Enhet
WLTC+ NEDC+ FTP75+ NYCC	546.67	626.54	426.63	686.76	717.26	503.19	[km]
$\frac{E_{total}}{distans}$	599	639.67	712.9	460.11	551.42	605.9	[J/m]

Tabell 4.10: Procentskillnaden efter optimering

Skillnad räckvidd och förbrukning				
Parametrar	P85	P100D	EQC	Enhet
Skillnad förbrukning	76.813	86.204	84.991	[%]
Skillnad räckvidd	125.626	114.480	117.945	[%]

Tabell 4.11 till 4.13 visar i detalj resultatet efter optimering av modellerna. Resultatet som visas är strukturerat utefter resultatet som publicerats för WP3, detta för att visa skillnaderna som optimeringen gjort.

4.4.5.1 Motståndsenergi

Tabell 4.11: Energi för rullmotstånd och luftmotstånd för alla körcykler kombinerat, WLTC + NEDC + FTP75 + NYCC

Förluster	P85	P100	Mercedes EQC 400	Enhet
E_{roll}	1021070	1214090	1151630	[KJ]
E_{drag}	267123	268008	334535	[KJ]

4.4.5.2 Förluster i motor

Tabell 4.12: Förluster i motor för alla körcykler kombinerat, WLTC + NEDC + FTP75 + NYCC

Förluster	P85	P100	Mercedes EQC 400	Enhet
$E_{loss,motor}$	3525930	5359230	7924160	[J]
$\frac{E_{loss,motor}}{distans}$	65.0752	98.79	145.031	[J/m]

4.4.5.3 Förluster i batteri och totalt

Tabell 4.13: Förluster i batteri för alla körcykler kombinerat, WLTC + NEDC + FTP75 + NYCC

Förluster	P85	P100	Mercedes EQC 400	Enhet
$E_{loss,batteri}$	238759	264378	209845	[J]
E_{total}	24929800	29925000	32343800	[J]
$\frac{E_{total}}{distans}$	460.11	551.626	591.968	[J/m]

5

Diskussion

5.1 WP1 - Informationshämtning

Informationen som hittades om de tre olika bilmodellerna anses med största sannolikhet vara korrekta. För första modellen kommer informationen direkt från Siemens demovideor vilket stöder den tesen. När det kommer till andra modellen, Tesla Model S P100D, stämde informationen från Siemens video överens med informationen från källorna [15], [16] och [17]. Därför ansågs den ytterligare information som hämtades från källorna som korrekt. Det hade dock varit bättre om all information kom direkt från tillverkaren men eftersom de ofta är försiktiga med att ge ut information så fick andra källor accepteras. Dessutom stämmer resultatet från simuleringen av körcykeln NEDC överens med officiella siffran från transportstyrelsen för modellen. För tredje modellen, Mercedes EQC400, kommer informationen från tillverkaren samt en statlig myndighet vilket gör den legitim.

5.2 WP2 - Prestandasimulering

Prestandasimuleringarna utfördes med avseende på de data och parametrar som hämtades. En jämförelse mellan den räckvidd som inhämtades i WP1 och den simulerade räckvidden i WP2 visar att de framtagna värdena varierar något. Marginalerna beror troligtvis på ett par faktorer. En av faktorerna är sättet den inhämtade informationen har producerats. Detta då graden av vetenskaplighet och metod i källorna varierar. De prestandasiffror som HOT presenterar skall enligt [23] betraktas som en approximation. Energiförbrukning och räckviddens exakthet beror på vilka parametrar som valts vid simuleringen. Den relativa likheten mellan resultat från tillverkarna och simuleringen tyder på en bra grundmodell och att den inhämtade datan överensstämmer med vad som är korrekt. Att resultaten med hänsyn taget till ovan är överensstämmande är också något som påvisar att de approximationer och förenklingar som gjorts är mestadels legitima. Att simuleringar gjorts i flertalet kör-cykler minskar också risken för att en eventuell felaktighet skulle påverka extra vid en viss typ av körning. Att en eventuell felaktighet skulle påverka på liknande sätt i all typ av körning utesluts dock inte med hjälp av metoden, men som beskrivits ovan är detta inte sannolikt eftersom resultaten från simuleringarna kontrollerats med de som uppnås i verkligheten. Vidare minskas variationernas påverkan ytterligare då det intressanta resultatet är exempelvis räckviddsförbättringar och huruvida olika förhållanden och trender kan observeras.

5.3 WP3 - Förlustanalys

Enligt de utförda simuleringarna och framtagna resultat beror en del av förlusterna på C_D -faktorn, utväxling och värmeförluster. Andra förluster såsom förlust i motorn och batteriet har också undersökts. Enligt figur 3.13 kommer ca 27% av totala förlusten från motorn. Detta värde är sannolikt mindre än verkligheten då förlustanalysen inte har tagit hänsyn till körsätt, väglag och andra externa faktorer. Dessutom har förlusten i motorn analyserats baserat på körda sträckan därav är det inte möjligt att jämföra mellan olika körcykler. Analysen av batteriförluster har också utförts med avseende på parametrar som är tillgängliga i Amesim och faktorer såsom vägförhållande och temperaturen har bortsetts. En bättre tillgång till data av externa faktorer eller simulering i olika vägförhållande och vädertemperatur skulle möjligtvis påverkat detta.

Med avseende på de tillgängliga parametrar, information, data och faktorer som finns i Amesim anses att den utförda förlustanalysen har utförts på ett rimligt och skickligt sätt men det hade varit bättre om tillgång till andra externa faktorer som påverkar förlustanalysen i de undersökta komponenter fanns. Då det skulle möjliggöra en jämförelse mellan dessa två typer av förlustanalys det vill säga en med enbart bilens parametrar och en med hänsyn till alla möjliga faktorer, både externa och interna. Denna jämförelse skulle ge en överblick på i vilken utsträckning inverkas räckvidden av andra faktorer.

5.4 WP4 - Optimering

5.4.1 Batteriteknik

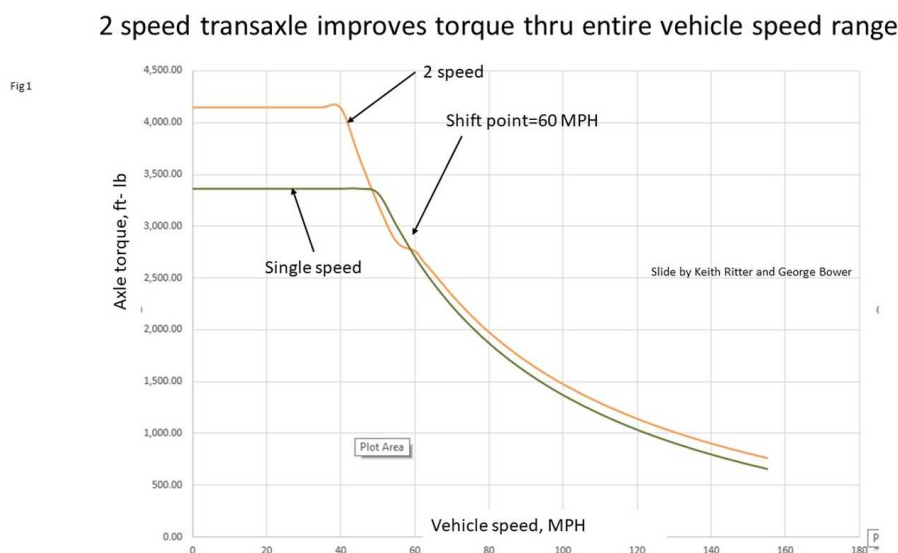
Det är tydligt att det finns god optimeringspotential för räckvidden men att den ofta är på bekostnad av prestandan, något som även känns intuitivt. De olika cellteknikerna verkar trots sin varierande interna resistans och spänning inte ha en större påverkan på räckvidden. Det är ändå värt att notera att det kraftiga spänningsfallet som kan observeras för NCA-C och NMC-C celler i figur 4.1 är utanför cutoff för Tesla P85 vilket kan förklara den lägre verkningsgraden i tabell 4.8. Det är möjligt att resultaten hade blivit annorlunda för Tesla P100 eller Mercedes EQC men då endast celltekniken varierades bör de olika trenderna och sambanden som noterades för P85 även vara densamma för de övriga fordonen. Det är ändå tydligt att endast kapacitetssiffror ej berättar hela bilden och att fordonstillverkare måste välja celler med omsorg eller ha tekniker på plats för att motverka de olika konsekvenserna av batteriernas interna resistans eller spänning.

5.4.2 Utväxling

Ett av de kanske mest överraskande resultaten var utväxlingens påverkan på räckvidden. Det noterades att en förbättring på 15% kunde uppnås för räckvidden men att detta även invercade accelerationen och maxhastigheten. Det är viktigt att notera att detta gällde för de motormappar som tillhandahölls av Amesim. Då det

är tydligt att verkningsgraden för motor (och därmed räckvidden) är beroende av varvtal och vridmoment. Resultatet som erhållits gäller alltså endast för Amesims motormapp (exempel på en motormapp kan ses i figur 2.6) och en femtonprocentig ökning är därför inte garanterad i verkligheten. Det observerades av både handledaren och gruppen att Amesims motormappar resulterar i en mycket låg räckvidd och att den speciellt för låga vridmoment har mycket dålig verkningsgrad. Detta innebär att den ökning i vridmoment som ses i figur 4.5 skulle resultera i en orealistisk stor ökning av verkningsgraden som ej är trolig för faktiska elbilmotorer. Ingen förutom Tesla och Mercedes vet exakt hur motormappen och styrsystemet för deras bilar ser ut och därmed hur stor ökning av verkningsgraden som är möjlig, men de motormappar som stötts på under arbetes gång har samtliga haft en lägre verkningsgrad vid låga varvtal och vridmoment. Detta skulle indikera att någon förbättring ändå är att vänta även för betydligt effektivare motorer än de som simulerats.

Vidare förklarar detta även samma slutsats som det står om i exempelvis [5], nämligen att körcykler med större acceleration får lägre energiförluster då den större accelerationen ökar vridmomentet vilket i de flesta fall bör öka motorns verkningsgrad. Givet att aggressiv körning har begränsningar, speciellt när det kommer till säkerhet, är en annan lösning att införa en växellåda i elbilar. Detta skulle möjliggöra snabb acceleration och bra räckvidd samt hög maxhastighet på bekostnad av extra massa för växellådan. Detta är något som Porsche har implementerat i sin modell Taycan. Enligt [24] handlar det om en tvåväxlad växellåda som främst ska ge ökad prestanda men även upp till 3% bättre räckvidd. Resultatet av detta på vridmomentet kan ses i figur 5.1. Dessutom jobbar enligt [25] ZF Friedrichshafen, som är en stor tysk underleverantör i fordonsbranschen vilka bland annat tillverkar Mercedes EQCs drivlina, på en tvåväxlad växellåda för BEV som fordontillverkare kan använda. Det är därmed inte osannolikt att det blir en vanligare syn i industrin och enligt resultaten i denna rapport är det en rimlig utveckling.



Figur 5.1: Vridmomentet för Porsche Taycan med två växlar från [24] som en funktion av hastigheten jämfört med en växel. Det är tydligt att speciellt för låga hastigheter är vridmomentet betydligt högre men även över hela hastighetsregistret.

5.4.3 Temperatur

Att batteri och motortemperaturen borde påverka räckvidden är något som är väldokumenterat. I [26] kan man bland annat se hur en låg batteritemperatur kraftigt minskar räckvidden. Dessutom behövs komponenterna ibland värmas eller kylas beroende på temperaturen vilket ytterligare förbrukar energi. Tyvärr observerades ej något samband mellan temperaturen och räckvidd eller förluster. Det är en svaghet i modelleringen som HOT gör vilken förvisso visar temperaturberoendet för olika batterier, men inte verkar implementera denna. Detta är något som annars hade varit av intresse att undersöka. Mer specifikt om den energiförlust som temperaturen orsakar är större eller mindre än den energi som krävs för att värma eller kyla komponenterna.

5.4.4 Däckbredd och luftmotstånd

Genom att ändra C_D i simuleringar ökar prestandan med 3.6% genom att minska luftmotståndskoefficienten C_D med 13% vilket Tesla har uppnått på sina senaste modeller. Detta är ingen optimering som har gjorts under projektet men har simulerats för att beräkna skillnaden ändå. Detta visar en faktor som skulle kunna optimeras i verkligheten. Vidare visar det också hur luftmotståndet förblir en av de största källorna till energiförlust och att det finns potential för stor räckviddsförbättring om man kan få ner värdet på C_D .

En annan faktor som påverkade resultaten var däckens bredd som redovisades i kapitel 4.4.4. Här redovisades resultat som inte riktigt förväntades. Det är lätt och inse att däckbredden torde ha viss inverkan. Speciellt då många specialfordon som exempelvis Chalmers Solar team, som tillverkar bilar för The Bridgestone World Solar Challenge där energieffektivitet är av största vikt, har mycket smala däck. Därav borde smala däck ge bättre räckvidd vilket förvisso noterades för framhjulen, men för bakhjulen gällde det motsatta med stor marginal. Förklaringen kommer från hur Amesim simulerar däckradien, vilken kan ses i ekvation 5.1. Här blir det tydligt att däckbredden påverkar däckradien. Vidare noteras i figur 4.7 att däckbredden på framdäcken ger ett förväntat beteende medan det endast är bakdäcket som ger den oväntade ökande förbrukningen för mindre bredd. Det ska noteras att denna figur gäller för en bakhjulsdriven bil, alltså att bakhjulet kopplas till motorn. Detta betyder att en ändring med däckbredd är ekvivalent med en förändring av däckhöjden vilket ändrar det vridmoment och varvtal som krävs av motorn för att hålla samma hastighet. Det är alltså samma effekt som ändringen av utväxlingen hade vilket visades var den komponent som påverkade räckvidden mest. En rimlig hypotes är att då däckhöjden kompenseras när bredden ändras fås samma resultat för bakdäcket som erhöles för framdäcken. Nämligen att en minskning däckbredden bör ge en aningen lägre förbrukning. Vidare finns det begränsningar för hur breda eller smala däck kan vara och de påverkar fler aspekter hos bilen än endast räckvidd. Sammanfattningsvis är detta ett område som kan och bör utforskas vidare i framtida arbeten.

$$R_w = \frac{D_{rim}}{2} + \frac{height \cdot width}{100} \quad (5.1)$$

Ekvationen 5.1 ovan kommer från Amesims dokumentation [13] och beskriver däckradien R_w med avseende på fälgdiametern D_{rim} , däckhöjden samt däckbredden.

6

Slutsats

Målet med det här kandidatarbetet har varit att utveckla förståelsen för simulering, i detta fall i programmet Amesim, samt med hjälp av denna förståelse förlänga räckvidden för utvalda elektriska fordon. Detta genom att använda förståelsen till att identifiera de komponenter som bidrar till störst energikonsumtion. Arbetet har haft störst fokus på att optimera drivlinans komponenter och hur de interagerar med varandra, medan delarna som ger upphov till energiförbrukningen framförallt har identifierats och dokumenterats mellan de olika bilmodellerna. Mindre förbättringar har dock gjorts för att uppdatera simuleringsmodellen när bilen uppdaterades.

Resultatet av simuleringarna visade att Amesims simuleringsresultat ger data som stämmer med datan för den verkliga bilen. Detta med hänsyn taget till de förenklingar och avgränsningar som gjorts under projektet. När förlusterna analyserades framstod det tydligt att det samlade motståndskrafterna på bilen var den enskilt största faktorn som påverkade räckvidden. Att minska dessa krafter ligger egentligen utanför området för arbetet, även om simuleringar har gjorts på detta område också. Det upptäcktes t.ex. under arbetet att Tesla Model S har uppdaterats och nu har ett lägre C_D . Om man bortser från dessa krafter och istället lägger fokus på bilens komponenter, var motorn den komponent som bidrog till de största förlusterna då batteriets interna förluster var av mindre betydelse. Detta gav således att optimering av motorn gav störst resultat på energiförbrukningen. Motorns verkningsgrad är påverkad av de varvtal och vridmoment som den arbetar inom, ändring av slutväxel möjliggjorde därmed att flytt motorn arbetspunkter till mer gynnsamma energiförbrukningsmässigt. Ändringen av slutväxeln ger en direkt påverkan av vilket vridmoment som appliceras på drivhjulen och därmed även på vilken acceleration och maxhastighet som fordonet presterar.

Projektets initiala frågeställning var om det var möjligt att uppnå en räckviddsförbättring på 10%, det resultat som uppnåddes varierade mellan 14.5% och hela 25.6%. Detta kom som beskrivet ovan genom att accelerationsförmågan minskades och därför är en frågeställning för vidare arbete om hur en flerstegad växellåda bäst implementeras och vilka förluster detta kan innebära.

Litteratur

- [1] Regeringskansliet. *Fossiloberoende fordonsflotta - ett steg på vägen mot nettonollutsläpp av växthusgaser*. 2015-04. URL: <https://www.regeringen.se/rattsliga-dokument/kommittedirektiv/2012/07/dir.-201278/>.
- [2] Vattenfall. *Vägen mot en fossilfri fordonsflotta*. 2019-04. URL: <https://energyplaza.vattenfall.se/blogg/vagen-mot-en-fossilfri-fordonsflotta>.
- [3] Erik Söderholm Mest Motor - Recharge. *Ny undersökning visar: Därför väljer köparna bort elbilen*. 2019-10. URL: <https://www.mestmotor.se/recharge/artiklar/nyheter/20191029/ny-undersokning-visar-darfor-valjer-koparna-bort-elbilen/>.
- [4] Irene Michelle Berry. "The Effects of Driving Style and Vehicle Performance on the Real-World Fuel Consumption of U.S. Light-Duty Vehicles". Examensarb. Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [5] Bernd Grohmann. "System-level simulations of the effects of driving cycles and driver behavior on the energy flow in a battery electric vehicle". Examensarb. Chalmers University of Technology, 2020.
- [6] Peter Nyberg. "Evaluation, Generation, and Transformation of Driving Cycles". Diss. Linköping University, 2015.
- [7] bartleby.com. *Solution answer to a textbox problem, from the book Engineering Fundamentals: An Introduction to Engineering*. URL: <https://www.bartleby.com/solution-answer/chapter-14-problem-11p-engineering-fundamentals-an-introduction-to-engineering-mindtap-course-list-5th-edition/9781305084766/as-we-explained-in-chapter-7-the-air-resistance-to-the-motion-of-a-vehicle-is-something-important/7941aadd-34b6-11e9-8385-02ee952b546e>.
- [8] Emma Arfa Grunditz. "Design and Assessment of Battery Electric Vehicle Powertrain, with Respect to Performance, Energy Consumption and Electric Motor Thermal Capability". Diss. Chalmers University of Technology, 2016.
- [9] Alessandro Marotta; Jelica Pavlovic; Biagio Ciuffo; Simone Serra; och Georgios Fontaras. "Gaseous Emissions from Light-Duty Vehicles: Moving from NEDC to the new WLTP test procedure." I: *Environmental Science & Technology* 49 (2015), s. 8315–8322.
- [10] Autocar. *Under the skin: the hierarchy of EV motor technology*. 2019-04. URL: <https://www.autocar.co.uk/car-news/technology/under-skin-hierarchy-ev-motor-technology>.
- [11] Learn engineering. *How does an Electric Car work ? | Tesla Model S*. 2017-05. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=3SAxXUIre28>.

- [12] x-engineer. *VEHICLESEV design – electric motors*. URL: <https://x-engineer.org/automotive-engineering/vehicle/electric-vehicles/ev-design-electric-motors/>.
- [13] Siemens. *Step-by-step select and optimize your hybrid powertrain architecture*. 2019-08. URL: <https://community.sw.siemens.com/s/article/step-by-step-select-and-optimize-your-hybrid-powertrain-architecture>.
- [14] Gunnar Latz. *Create in no time your model to optimize electrified vehicle using available data*. URL: <https://view.highspot.com/viewer/601423f8a2e3a93b77c40c29>.
- [15] it's the first all-electric car with over 300 miles of range Tesla's new Model S P100D is not only quick. *2018 Tesla Model S P100D - specifications*. 2016-08. URL: <https://electrek.co/2016/08/24/tesla-model-s-p100d-first-all-electric-car-over-300-miles-range/>.
- [16] Electrek. *Teardown of new 100 kWh Tesla battery pack reveals new cooling system and 102 kWh capacity*. 2017-01. URL: <https://electrek.co/2017/01/24/tesla-teardown-100-kwh-battery-pack/>.
- [17] EVSpecifications. *2018 Tesla Model S P100D - specifications*. 2021. URL: <https://www.evspecifications.com/en/model/399355>.
- [18] Erik Söderholm Mest Motor - Recharge. *Mercedes EQC 400 4Matic är officiell – här är nya elsuven som premiärvisades i Stockholm*. 2018-09. URL: https://www.mestmotor.se/recharge/artiklar/nyheter/20180904/mercedes-eqc-ar-officiell-har-ar-nya-elsuven-som-premiarvisades-i-stockholm/?utm_campaign=unspecified%5C&utm_content=unspecified%5C&utm_medium=email%5C&utm_source=Newsletter.
- [19] Transportstyrelsen. *Fordons- och ägaruppgifter*. URL: <https://www.transportstyrelsen.se/Fordons-agaruppgift/>.
- [20] Mercedes Benz. *EQC 400 Tekniska data*. 2021-04. URL: <https://www.mercedes-benz.se/passengercars/mercedes-benz-cars/models/eqc/specifications/battery.module.html>.
- [21] Amesim. *Hybrid Optimization Tool*. Siemens. 2020.
- [22] Tesla. *Model S, Exteriör*. 2021-05. URL: https://www.tesla.com/sv_se/models.
- [23] Amesim. *Electric vehicle - Vehicle analysis, electric motor and battery specification*. Siemens. 2020.
- [24] InsideEVs George Bower. *Porsche Taycan 2-Speed Rear Transaxle: Performance Modeled*. 2019-04. URL: <https://insideevs.com/news/343827/porsche-taycan-2-speed-rear-transaxle-performance-modeled/>.
- [25] Eric Adams. *Why the Porsche Taycan's Two-Speed Gearbox Is Such a Big Deal*. 2019-05. URL: <https://www.wired.com/story/electric-car-two-speed-transmission-gearbox/>.
- [26] Green eMotion. *HOW DOES TEMPERATURE AFFECT EV PERFORMANCE?* URL: <http://education.greenemotion-project.eu/the-big-picture/how-does-temperature-affect-ev-performance.aspx>.

A

Appendix: Information om P85

Figur A.1

Tesla Model S P85

Electric Drive		units	source
Max power	309	kW	[14]
Max torque	600	Nm	[14]
Techno	squirrel cage asynchronous motor (eff 0,88)		[14]
			[14]
			[14]
Max rot. speed	15000	rpm	[14]

Battery		units	source
Real capacity	82	kWh	[14]
Usable capacity	77.5	kWh	[14]
Pack	16	modules	[14]
	6	blocs/module	[14]
	74	cells/bloc	[14]
Cells	7104	#	[14]
Weight	540	kg	[14]
Tension	3.6	V/cell	[14]
	345.6	V	[14]
Capacity	3.2	Ah/cell	[14]
	236.8	Ah	[14]

Figur A.2

Vehicle		units	source
Frontal area	2.34	m ²	[14]
Drag coefficient	0.24		[14]
Drag Area	0.5616	m ²	[14]
Weight	2200	kg	[14]
Coulomb friction	0.01		[14]
Viscus friction	1.00E-04	1/(m/s) ²	[14]
Windage	1.00E-06	1/(m/s) ²	[14]

Transmission		units	source
Reduction ratio	9.73		[14]

Tires		units	source
Front	245/35R21		[14]
Rear	245/35R21		[14]

Auxiliary consumption estimation		units	source
ECUs + Screens + Cool	0.1	KW	[5]

Figur A.3

Range		units	source
NEDC	502	km	[14]

Performance		units	source
Top speed	210	km/h	[14]
	58.33	m/s	[14]
0 - 60	2.4	s	[14]
0 - 100	4.4	s	[14]
0 - 200	19	s	[14]

B

Appendix: Information om P100D

Figur B.1

Tesla Model S P100D

Electric Drive Front		units	source
Max power	193	kW	[17]
Max torque	330	Nm	[17]
Techno	squirrel cage asynchronous motor (eff 0,88)		[17]
			[17]
			[17]
Max rot. speed	19000	rpm	[17]

Electric Drive Rear		units	source
Max power	375	kW	[17]
Max torque	600	Nm	[17]
Techno	squirrel cage asynchronous motor (eff 0,88)		[17]
			[17]
			[17]
Max rot. speed	19000	rpm	[17]

Battery		units	source
Real capacity	102.4	kWh	[16]
Usable capacity	98.4	kWh	[16]
Pack	16	modules	[16]
	6	blocs/module	[16]
	86	cells/bloc	[16]
Cells	8256	#	[16]
Weight	540	kg	[16]
Tension	3.6	V/cell	[16]
	345.6	V	[16]
Capacity	3.43	Ah/cell	[16]
	294.98	Ah	[16]

Figur B.2

Vehicle		units	source
Frontal area	2.34	m ²	[14]
Drag coefficient	0.24		[14]
Drag Area	0.5616	m ²	[14]
Weight	2200	kg	[14]
Coulomb friction	0.01		[14]
Viscus friction	1.00E-04	1/(m/s) ²	[14]
Windage	1.00E-06	1/(m/s) ²	[14]

Transmission		units	source
Reduction ratio	9.73		[14]

Tires		units	source
Front	245/35R21		[14]
Rear	245/35R21		[14]

Auxiliary consumption estimation		units	source
ECUs + Screens + Cool	0.1	KW	[5]

Figur B.3

Range		units	source
NEDC	502	km	[14]

Performance		units	source
Top speed	210	km/h	[14]
	58.33	m/s	[14]
0 - 60	2.4	s	[14]
0 - 100	4.4	s	[14]
0 - 200	19	s	[14]

C

Appendix: Information om EQC400

Figur C.1

Mercedes EQC400

Electric Drive Front		units	source
Max power	150	kW	[18]
Max torque	382,5	Nm	[18]
Techno	squirrel cage asynchronous motor (eff 0,88)		[18]
Max rot. speed	13100	rpm	est

Electric Drive Rear		units	source
Max power	150	kW	[18]
Max torque	382,5	Nm	[18]
Techno	squirrel cage asynchronous motor (eff 0,88)		
Max rot. speed	13100	rpm	est

Battery		units	source
Real capacity		kWh	[18]
Usable capacity	80	kWh	[18]
Pack	4	Parallel	[18]
	96	Serie	[18]
Cells	384	#	[18]
Weight	650	kg	[18]
Tension	3.6	V/cell	[18]
	345.6	V	[18]
Capacity	56.734	Ah/cell	[18]
	226.936	Ah	[18]

Figur C.2

Vehicle		units	source
Frontal area	2.34	m ²	[14]
Drag coefficient	0.24		[14]
Drag Area	0.5616	m ²	[14]
Weight	2200	kg	[14]
Coulomb friction	0.01		[14]
Viscus friction	1.00E-04	1/(m/s) ²	[14]
Windage	1.00E-06	1/(m/s) ²	[14]

Transmission		units	source
Reduction ratio	9.73		[14]

Tires		units	source
Front	245/35R21		[14]
Rear	245/35R21		[14]

Auxiliary consumption estimation		units	source
ECUs + Screens + Cool	0.1	KW	[5]

Figur C.3

Range		units	source
NEDC	450	km	[18]
		%	
WLTP	407	km	[19]
		%	

Performance		units	source
Top speed	180	km/h	[20]
	50	m/s	
0 - 60		km/h	
0 - 100	5.1	km/h	[20]
0 - 200		km/h	



CHALMERS