



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2022 30 stp.
Fakultet for realfag og teknologi

En studie av drivlinjen til elektriske lastebiler

A Study of the Driveline for Electric Trucks

Jan Tore Andersen
Maskin, prosess- og produktutvikling


FORORD

Denne masteroppgaven er skrevet av Jan Tore Andersen som avsluttende oppgave på linjen Maskin, prosess- og produktutvikling ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Initiativtaker til oppgaven er Institutt for matematikk og realfag (REALTEK) ved NMBU. REALTEK ønsket å øke kunnskapen om elektriske motorer, drivverk og kjøretøyparametere for elektriske lastebiler. Derfor ble denne oppgaven initiert med fokus på elektriske lastebilers oppbygning og yteevne.

Rapporten har en pedagogisk oppbygning og inneholder grunnlagsteori om elektriske motorer, kjøretøysdynamikk og batteriteknologi. Videre blir drivverket til tre lastebiler presentert sammen med kurver som viser ytelsen. Deretter, i beregningskapittelet, blir det gjort beregninger på de ulike kjøretøyene. For å verifisere beregningene er det blitt utført ulike tester med en elektrisk lastebil. Avslutningsvis er det en oppsummering av hovedtrekkene i oppgaven og en sammenlikning mellom drivverket i de ulike lastebilene.

Det er ønskelig at rapporten skal være til nytte for ingeniørstudenter som ønsker å lære mer om oppbygningen til drivverket i elektriske lastebiler. Leseren bør ha tekniske kunnskaper på ingeniørnivå og om grunnleggende kjøretøysteori for å få best utbytte av rapporten.

Jeg vil rette en stor takk til min veileder Geir Terjesen for god hjelp gjennom hele oppgavens forløp. I tillegg vil jeg takke Roger Grimstad, Mikael Hansen, Vidar Fagersand og Erlend Emilsen ved Scantias opplæringskontor på Kløfta for hjelp med innhenting av informasjon og praktisk testing. Jeg vil også rette en takk til Jostein Eriksen ved Volvo Truck Center Drammen for hjelp med anskaffelse av data for lastebilen til Volvo.



Jan Tore Andersen, 15.05.2022

SAMMENDRAG

Fakultet for realfag og teknologi (REALTEK) ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU) ønsket å øke kunnskapen om elektrifisering av tungtransport. Derfor ble denne masteroppgaven initiert våren 2022. Det var ønskelig å samle inn informasjon om ulike designløsninger, drivverksparametere og ytelsen til elektriske lastebiler. Elektrifiseringen av tungtransportbransjen er godt i gang og regjeringen i Norge har satt konkrete mål som omfatter elektrifiseringen. Produsentene konkurrerer om de beste løsningene. REALTEK ønsket informasjon om drivverket til elektriske lastebiler for å kunne modellere nye kjøretøy og verifisere eksisterende løsninger.

I oppgaven er det benyttet litteratursøk, informasjonsinnhenting fra ressurspersoner, estimeringer, beregninger og fysisk testing som metoder. Det har blitt opprettet kontakt med ressurspersoner i Scania og Volvo som har bidratt med informasjon om sine respektive kjøretøy. I hovedsak er det Scania P25 og Volvo FL Electric som er studert i denne oppgaven. Det er innhentet og estimert kjøretøysparametere for begge kjøretøyene. I tillegg er det hentet inn informasjon om ulike designløsninger for drivverket i elektriske lastebiler. Det er utført praktisk testing av Scania P25 for å verifisere beregningene som er utført. Beregnet akselerasjon fra 0-80 km/t var 21,4s, praktisk testing ga en gjennomsnittstid på 21,9s. Dette tyder på at beregningene og estimeringene som er gjort er fornuftige.

Elektriske motorer er mindre og har annerledes momentkarakteristikk og turtallsområde enn dieselmotorer, noe som gjør andre designvalg aktuelle. Fem ulike drivverkskonfigurasjoner er presentert i denne oppgaven. De ulike løsningene utforsker ulike måter å overføre den mekaniske energien fra motoren til drivhjulene. Den løsningen som Scania og Volvo har benyttet i sine elektriske lastebiler består av en elektrisk motor av typen permanentmagnetsynkronmotor som er montert under kjøretøyet. Fordelen med denne typen elektrisk motor er at den kan levere høyt dreiemoment ved lavt turtall, noe som er svært gunstig i et tungt kjøretøy som ikke behøver høy topphastighet. Motoren er i begge tilfellene koblet direkte til en tottrinns girkasse. Videre overføres kraften via en mellomaksel, differensial og stikkakslinger til drivhjulene. Som resultat av litteraturstudiet er det to kilder som peker seg ut som svært nyttige:

- Artikkelen *Influence of powertrain Topology and Electric Machine Design on Efficiency of Battery Electric Trucks – A Simulative Case Study* av Sebastian Wolff m.fl. [1]
- Boken *Heavy-Duty Electric Vehicles* av Shashank Arora m.fl. [2]

Nøkkelord: Elektrisk lastebil, drivlinje, ytelse, drivverksparametere

ABSTRACT

Faculty of Science and Technology (REALTEK) at the Norwegian University of Life Sciences (NMBU) had a wish to improve the knowledge about the electrification of heavy vehicles. That is why this master's thesis was initiated by REALTEK in the spring of 2022. It was desirable to gather information on various design solutions, powertrain parameters and the performance of electric trucks. The electrification of the heavy haulage industry is on its way. The government in Norway have defined clear goals for this electrification process. The truck producers are competing to produce the best solutions. REALTEK wants more knowledge on this topic to model new vehicles and to verify existing solutions.

This thesis uses literature search, information gathering from resource persons, estimations, calculations, and physical testing as methods. Resource persons in Scania and Volvo helped collecting information about their respective vehicles. Mainly the Scania P25 and the Volvo FL Electric was studied in this report. Drivetrain parameters for both vehicles were collected. In addition, the information about different drivetrain topologies was presented. Practical testing of the Scania P25 was carried out. The estimated acceleration from zero to 80 km/h was 21,4s, and the measured mean acceleration was 21,9s. This means that the calculations and estimations conducted during the report is reasonable.

Electric motors are smaller and have different moment characteristics and area of speed than diesel engines, this makes new design choices available. Five different topologies were presented in this report. The different topologies explore different ways to transfer the mechanical energy from the motor to the drive wheels. Both Scania and Volvo used the same configuration in their electric trucks. The electric motor used in both trucks was a permanent magnet synchronous motor (PMSM) mounted directly under the vehicle. The PMSM is well suited for the heavy electric trucks because it can deliver high torque at low speeds. This is perfect for the trucks not needing a high maximum speed. The PMSM is directly connected to a two-speed gearbox. Then the differential is connected to the gearbox by a prop shaft, and then from the differential to the wheels by the axle shafts. As a result of the literature study two sources stand out to be the most useful:

- The article *Influence of powertrain Topology and Electric Machine Design on Efficiency of Battery Electric Trucks – A Simulative Case Study* by Sebastian Wolff et.al. [1]
- The book *Heavy-Duty Electric Vehicles* by Shashank Arora et.al. [2]

Key words: electric trucks, performance, drivetrain, drivetrain parameters

Innhold

FORORD	I
SAMMENDRAG	II
ABSTRACT	III
1. Ord- og symbolliste	1
2. Innledning	3
2.1 Bakgrunn	3
2.2 Problemstillinger	4
2.3 Delmål.....	4
2.4 Metode for informasjonsinnhenting	4
2.5 Metode for beregningsgrunnlag	4
2.6 Kvalitetssikring.....	5
2.7 Begrensninger.....	5
3. Historikk – Elektriske lastebiler	5
3.1 Historikk.....	5
4. Grunnlagsteori.....	6
4.1 Kjøremotstand	6
4.1.1 Luftmotstand	7
4.1.2 Rullemotstand	9
4.1.3 Formelverk for estimering av rullemotstandskoeffisient og luftmotstandskoeffisient	11
4.1.4 Stigningsmotstand	11
4.1.5 Akselerasjonsmotstand	12
4.1.6 Total kjøremotstand og arbeidsbehov	14
4.1.7 Drivkraftkurver	15
4.1.8 Drivverkets virkningsgrad	15
4.2 Elektriske motorer	17
4.2.1 Grunnleggende elektromagnetisme	17
4.2.2 DC-motor	21
4.2.3 Børsteløs DC-motor	23
4.2.4 AC-motor	23
4.2.5 Reluktansmotor	24
4.2.6 Induksjonsmotor	25
4.2.7 Motoreffekt	28
4.2.8 Effektivitet i elektrisk motor	29
4.2.9 Ulike motorers karakteristikker	30
4.3 Batteriteknologi.....	32

4.3.1 Grunnlag for batteriteori.....	32
4.3.2 Litium-ion-batteri	33
4.3.3 Batterikarakteristikk.....	34
4.4 Drivverk/Kraftoverføringssystem i tunge elektriske kjøretøy	35
4.4.1 Motorplassering	35
4.4.2 Akselkonfigurasjon	37
4.5 Klassifisering av lastebiler.....	38
4.6 utfordringer i forbindelse med arbeid på elektriske kjøretøy	38
5 Resultater 1: Innsamlet informasjon.....	39
5.1 Studie av elektrisk lastebil fra Scania	39
5.1.1 Generell beskrivelse av elektrisk lastebil fra Scania	39
5.1.2 Oversikt over drivlinjen fra Scania.....	40
5.1.3 Elektrisk motor i lastebil fra Scania	41
5.1.4 Girkasse i lastebil fra Scania	43
5.1.5 Bakaksling i lastebil fra Scania	43
5.1.6 Batteripakker og elektrisk styringssystem i lastebil fra Scania.....	44
5.1.7 Tap i drivverk.....	45
5.2 Studie av Volvo FL Electric.....	46
5.2.1 Generell beskrivelse av FL-Electric	46
5.2.2 Oversikt over drivlinjen i Volvo FL Electric	46
5.2.3 Motoren i Volvo FL Electric	47
5.2.4 Batteripakke i Volvo FL Electric	48
5.2.5 Girkasse og bakaksel i Volvo FL Electric	48
5.3 Lastebil med dieselmotor.....	49
5.3.1 Introduksjon Scania P250.....	49
5.3.2 Motor i Scania P250.....	50
5.3.3 Girkasse i Scania P250	50
6. Beregninger	52
6.1 Beregninger Scania P25	52
6.1.1 Beregning av luftmotstand.....	52
6.1.2 Beregning av rullemotstand	53
6.1.3 Beregning av treghetsmoment for roterende komponenter.....	55
6.1.4 Total kjøremotstand	59
6.1.5 Effektbehov	61
6.1.6 Maksimalt dreiemoment på drivhjulene ut fra momentkurvene	61
6.1.7 Drivkraftkurve.....	62

6.1.8 Beregning av akselerasjon fra 0 til 80 km/t for Scania P25	63
6.2 Beregninger Volvo FL Electric	65
6.2.1 Beregning av utvekslingsforhold i bakaksel.....	65
6.2.2 Beregning av momentkurven til ET402	66
6.3 Beregninger Scania P250 (diesel)	67
6.3.1 Drivkraftkurve.....	67
7. Resultater 2: Testing på landevei	68
7.1 Tester av Scania P25	68
7.1.1 Test 1: Akselerasjonstest.....	68
7.1.2 Test 2: Estimering av rullefriksjonskoeffisient og luftmotstandskoeffisient.....	68
8 Diskusjon	70
8.1 Sammenlikning av presenterte lastebiler.....	70
8.2 Elektrisk motor sammenlignet med dieselmotor.....	71
8.3 Teoretiske beregninger sammenliknet med praktisk testing.....	71
8.4 Hvorfor PMSM.....	72
8.5 Resultat av litteraturstudiet	72
8.6 Anbefalinger for videre arbeid	72
9 Konklusjon	73
Referanser	75

1. Ord- og symbolliste

Tabell 1: Symboler benyttet i rapporten

Symbol	Betydning	Enhet
\vec{B}	Magnetfelt	Tesla
\vec{E}	Elektrisk felt	Henry
\vec{F}	Lorentzkraften	N/C
ϵ_0	Elektrisk konstant	farad/m
A	Projisert frontareal	m ²
a	Akselerasjon	m/s ²
C_D	Luftmotstandskoeffisienten	-
f	Rullemotstandskoeffisient 1	N/N
F_A	Akselerasjonsmotstand	N
F_{A_L}	Lineær akselerasjonsmotstand	N
F_{A_ω}	Roterende akselerasjonsmotstand	N
F_{Hjul}	Kjøretøyets totale skyvkraft	N
F_L	Luftmotstand	N
F_R	Rullemotstand	N
F_S	Stigningsmotstand	N
g	Tyngdekraften	N/kg
I	Massetreghetsmoment	kgm ²
I	Strøm	A
i_d	Utvekslingsforhold differensial	-
i_g	Utvekslingsforhold girkasse	-
K_m	Motorkonstanten	
m	Masse	kg
m_{ekv}	Ekvivalent translatorisk masse	kg
N	Normalkraft	N
n	Turtall/antall	rpm/-
P_{hjul}	Effekt ved drivhjulene	W
P_{motor}	Motoreffekt	W
P_{tot}	Total effekt	W
q	Ladning	Coulomb (C)
R	Hjulradius	m
RCC	Rullemotstandskoeffisient 2	N/kN
s	Slipp	-
T	Dreiemoment	Nm
v	Hastighet	m/s og km/t
V	Spenning	Volt
α	Stigningsvinkel	°
η	Virkningsgrad	-
ρ	Tetthet	kg/m ³

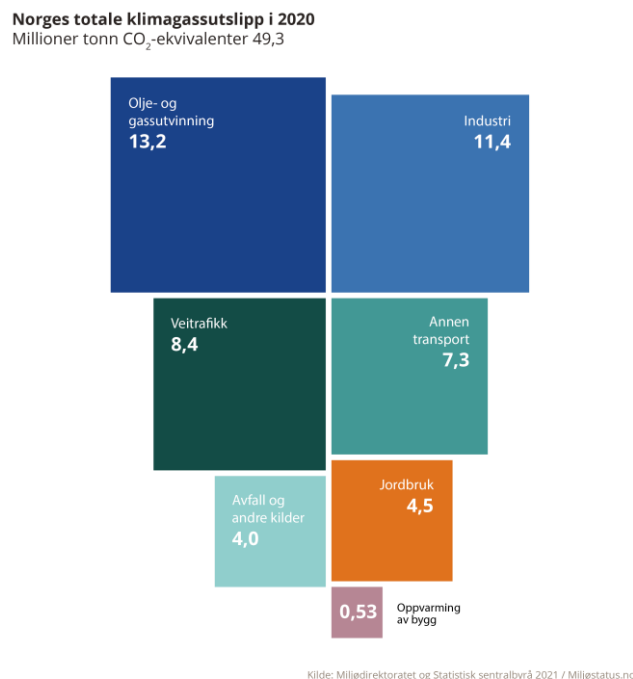
Tabell 2: Terminologi

Uttrykk:	Definisjon:
Asynkronmotor	Type elektrisk motor der rotoren ikke roterer like fort som magnetfeltet i statoren
Drivkraft	Kraften som driver et kjøretøy
CAD	Computer-aided Design
eMachine	Scanias kombinerte elektriske motor og girkasse
Induksjonsmotor	Elektrisk motor basert på induisert strøm i rotoren
Lorentzkraft	Mekanisk kraft som virker på en elektrisk leder på grunn av et magnetfelt
PMSM	permanentmagnetsynkronmotor – elektrisk motor med rotor konstruert av permanentmagneter
Reluktansmotor	Type elektrisk motor som baserer seg på reluktans i rotoren
RRC	Rolling Resistance Coefficient – Rullefriksjonskoeffisient
Slipp	Et mål på hvor ute av synkronisering rotorhastighet er i forhold til magnetfeltets rotasjon
Synkronmotor	Type elektrisk motor der rotoren roterer like fort som magnetfeltet i statoren
SoC	State of Charge – Hvor mye strøm som er lagret i et batteri
SoH	State of Health – Hvor mye strøm et batteri kan lagre

2. Innledning

2.1 Bakgrunn

Transport og veitrafikk er blant de største kildene til klimagassutslipp i Norge og veitrafikk står alene for cirka 17 % av Norges totale klimagassutslipp [3], se figur 1. Myndighetene stiller stadig større krav om en miljøvennlig kjøretøypark. Norske myndigheter har ifølge nasjonal transportplan (2022-2033) satt et nasjonalt mål om at innen 2030 skal 50 % av alle nye lastebiler som selges, være nullutslippskjøretøy. Innen 2025 skal alle nye personbiler, lette varebiler og bybusser være nullutslippskjøretøy eller bruke biogass. [4] Fabrikantene konkurrerer derfor om å lage mer miljøvennlige kjøretøy, med bedre kjøreegenskaper. Elbilen har fått et enormt gjennombrudd. Nå står også elektrifisert tungtransport på agendaen.



Figur 1 – Norges totale klimagassutslipp, fordelt på de ulike sektorene.
- Kilde: Miljødirektoratet [3]

På ingeniørsiden er det nødvendig med kunnskap om elmotorer, drivverk og andre kjøretøyparametere slik at nødvendige beregninger kan gjøres for å modellere nye kjøretøy. Fakultet for realfag og teknologi (REALTEK) ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU) ønsker å øke kunnskapen om elektrifisering av tungtransport og har derfor initiert denne masteroppgave hvor yteevnen står i fokus. Det er ønskelig å studere lastebilene til flere fabrikanter og fremskaffe data slik at det er mulig å gjøre drivverksberegninger på de utvalgte kjøretøyene. Det er ønskelig at oppgaven får en pedagogisk oppbygging slik at kommende studenter og andre interesserte kan få nytte av rapporten.

Dagens fossildrevne lastebiler har girkasser som kan ha opptil 16 gir (og differensial) for å utnytte motorens kraft best mulig. Elektriske motorer er mindre og mer praktiske enn tradisjonelle innsprøytningsmotorer. Dette åpner opp for flere designmuligheter enn før. Motoren behøver nødvendigvis ikke å bli plassert framme under panseret. Samtidig har elektriske motorer en annen type momentkarakteristikk som åpner opp for en annen type giring. Ulike designmuligheter blir gjennomgått i denne oppgaven. Av tidligere arbeid som er relevant for dette, og som har vært nyttig under utarbeidningen av studiet, er det verdt å nevne:

- Artikkelen *Influence of powertrain Topology and Electric Machine Design on Efficiency of Battery Electric Trucks – A Simulative Case Study* av Sebastian Wolff m.fl. [1]

- Boken *Heavy-Duty Electric Vehicles* av Shashank Arora m.fl. [2]

2.2 Problemstillinger

Det er ønskelig å hente inn og presentere informasjon om drivlinjene i elektriske lastebiler fra ulike produsenter. I tillegg skal det hentes informasjon om ulike designløsninger i forhold til drivlinjen. I forbindelse med litteraturstudiet er det også ønskelig å gjøre beregninger på drivverket i en elektrisk lastebil og verifisere beregningene med praktisk testing.

2.3 Delmål

- Kartlegge aktuell teknologi for drivverket på elektrisk lastebil
- Gå til anskaffelse av momentkurver for elektrifiserte lastebiler
- Gjøre beregninger ved hjelp av momentkurvene
- Samle informasjonen i en oversiktlig rapport
- Presentere ulike designløsninger for drivverket i elektriske lastebiler
- Verifisere beregninger ved hjelp av praktisk testing

2.4 Metode for informasjonsinnhenting

I denne rapporten er det blitt benyttet litteraturstudier og innhenting av data fra ressurspersoner i Volvo og Scania. Dataen er hentet inn ved hjelp av fysiske møter, mailutvekslinger og telefonsamtaler. I tillegg er det benyttet praktisk testing for å verifisere beregningene som er gjort.

2.5 Metode for beregningsgrunnlag

Beregningene i denne rapporten blir utført ved hjelp av formelverk, estimeringer og CAD-program. Grafer og beregninger blir gjort i Microsoft Excel.

2.6 Kvalitetssikring

Rapporten er kontrollert og språkvasket. Referanser, sidenummer, figurnummer og tabellnummer er kontrollert. Utregninger er gjort to ganger og kontrollert med Excel. I tillegg så er utregningene kontrollert ved praktisk testing.

2.7 Begrensninger

- Drivverkets virkningsgrad blir satt til 90 %. Dette gjelder mekaniske tap mellom girkasse og drivhjul. Dette gjøres på grunn av mangel på reelle virkningsgrader og fordi det er svært mange faktorer som spiller inn.

- Det blir gjort detaljerte drivverksberegninger på en av de elektriske lastebilene. Om det er ønskelig med data om de andre lastebilene kan det reproduseres med samme formelverk så lenge kjøretøysparameterne er tilgjengelig.

- Lastebilenes rekkevidde blir ikke diskutert i denne rapporten.

3. Historikk – Elektriske lastebiler

3.1 Historikk

På slutten av 1800-tallet var det et teknologikappløp mellom ulike fremdriftssystemer for lastebiler og personbiler. I følge Energy.gov [5] var 1/3 av alle kjøretøy på amerikanske veier elektriske på starten av 1900-tallet. Dette var frem til det blir gjort store funn av olje i Texas som førte til at forbrenningsmotoren tok over. [5] Elektriske kjøretøy ble etter dette benyttet i noen spesialtilfeller som melketransport, postlevering og på industriområder.



Figur 2 - Walker Electric Truck lastebiler eid av NSB. Kilde: Nasjonalbibliotekets bildesamling

I Norge var ble det også benyttet elektriske lastebiler en periode etter 1. verdenskrig da tilgangen på fossilt drivstoff var liten. Etter hvert som tilgangen på drivstoff økte, ble det heller benyttet fossildrevne lastebiler. Lastebilene fra Walker som er avbildet på figur 2 ble det importert over 100

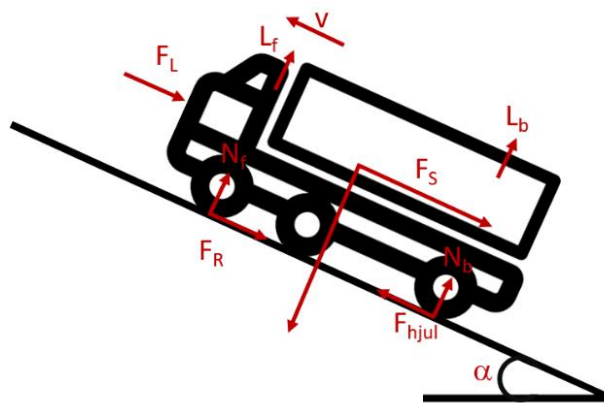
av frem til 1921. Disse ble blant annet benyttet av meierier til melkekjøring. I følge JCRIST MUSEUM som har restaurert denne modellen, ble denne lastebilen levert med en elektrisk motor med 3,5 hestekrefter. Rekkevidden på lastebilen var cirka 50 km. Topp hastigheten var cirka 20 km/t. [6]

Videre ble det ikke gjort merkverdige fremskritt på området før li-ion-batteriene ble tatt i bruk mot slutten av 1900-tallet. Likevel har det ikke skjedd noen store gjennombrudd. Utviklingen går sakte, men sikkert. Hele tiden skjer det små endringer i valg av type elektrisk motor og størrelsen på batteripakkene som angår rekkevidden.

4. Grunnlagsteori

4.1 Kjøremotstand

Ytre krefter som virker på kjøretøy i bevegelse blir vist i figur 3.



Figur 3 - Viser kreftene som virker på et kjøretøy i bevegelse

Det er flere ulike krefter som hindrer et kjøretøy fra å akselerere fritt. For at et kjøretøy skal akselerere må skyvekraften på hjulene, F_{hjul} , være større enn den totale kjøremotstanden F_{tot} . Hvis skyvekraften er mindre enn kjøremotstanden vil kjøretøyet retardere. Det som er relevante i denne rapporten er luftmotstand, rullemotstand, stigningsmotstand og akselerasjonsmotstand. Krefter som ikke blir tatt med i betraktningen er blant annet løft (L) (et raskt kjøretøys tendens til å lette som et fly), og vindmotstand. Formel 1 beskriver relasjonen mellom total skyvekraft og de ulike kjøremotstandene.

$$F_{hjul} = F_{tot} = F_L + F_R + F_S + F_A$$

(1)

4.1.1 Luftmotstand

En av de største bremsende kreftene som virker på et kjøretøy i bevegelse, er dragkrefter på grunn av luftmotstand. Denne kraften oppstår på grunn av luften som kolliderer med fronten av kjøretøyet. Ifølge boken Motorteknikk – Bilteknikk (2002), av Leif Lundby m.fl. [7] er det fire hovedårsaker til at et kjøretøy møter luftmotstand under kjøring. Den første årsaken er overflatefriksjon på karosseriet. Det oppstår friksjon mellom luften og kjøretøyet overflater. Overflatefriksjonen står for ca. 20-25% av den totale luftmotstanden [7]. Den andre årsaken er hvordan trykket fordeles ujevnt over kjøretøyet karosseri. Den tredje årsaken er ujevnheter som hjul og speil. Den fjerde årsaken, som i mange tilfeller ikke er relevant for elektrifiserte kjøretøy, er virkningene fra kjøleluftinntak/grill til motor.

Til sammen gir disse fire årsakene en total luftmotstand, F_L . Luftmotstanden beskrives med formel 2.

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot A \cdot \rho \cdot v^2$$

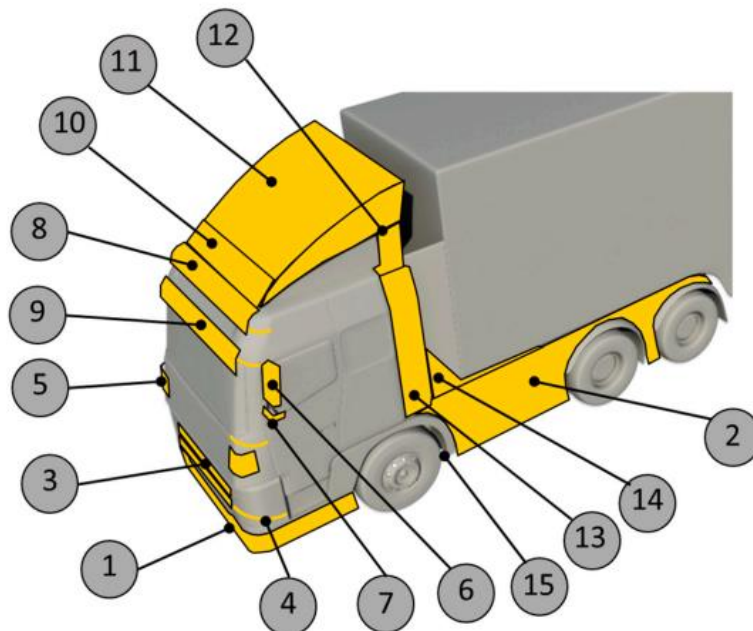
(2)

ρ er tettheten til luft (kg/m^3), A er arealet til fronten av kjøretøyet (m^2). C_D er luftmotstandskoeffisienten/dragkoeffisienten. C_D er en størrelse som er avhengig av kjøretøyet utforming. Eksempler på verdier for C_D er presentert i tabell 3. Årsaken til at verdien er under 1 er fordi all luft ikke blir skjøvet foran kjøretøyet. Kjøretøyene er utformet slik at en stor andel av luften vil gli forbi. Til slutt er luftmotstanden avhengig av kjøretøyet hastighet kvadrert. Fartsøkning vil altså ha stor innvirkning på den totale luftmotstanden.

Tabell 3: Oversikt over luftmotstandskoeffisienter for ulike kjøretøy

Kjøretøy	Verdi, C_D
Standard lastebil	0,6+ [7]
Lastebil med heldekkende takspoiler og sideskjørt	0,45 [7]
Personbil (Toyota Camry 1997)	0,3 [8]
Tesla Semi	0,36 [9]
Tesla Model 3	0,23 [10]
Buss	0,6-0,7 [11]

Det er mange måter designet til en lastebil kan påvirke luftmotstandskoeffisienten. I prosjektrapporten "A study in Options to Improve Aerodynamic Profile of Heavy-Duty Vehicles in Europe" [12] presenteres 15 designløsninger. De ulike løsningene blir vist i figur 4.



Figur 4 - Ulike metoder å forbedre en lastebils aerodynamiske egenskaper Kilde: [12]

1. "Air dam", spoiler som leder luften til siden av kjøretøyet
2. Sidepaneler som dekker til tomrom hjulene på kjøretøyet
3. Grilldeksel som hindrer luften i å flyte gjennom motoren. Det er viktig at disse panelene åpnes om motoren trenger nedkjøling.
4. Radiusen på hyttas hjørner skal helst være så stor som mulig, slik at luften blir ført til siden av kjøretøyet.
5. «Sidevinger» på hytta som i forbindelse med kjøretøyets lykter leder luften til siden.
6. Speil som er aerodynamisk designet.
7. Noen produsenter har begynt å bruke sidekameraer i stedet for sidespeil. Med mindre frontareal vil luftmotstanden reduseres.
8. Avrundet sidekant på toppen av hytta.
9. Visir som i utgangspunktet benyttes til å skjerme sjåfør fra solen kan i noen tilfeller ha en positiv innvirkning på luftmotstanden.
10. Deflektor på toppen av hytta som leder luften over og forbi hytta.
11. Deflektor som leder luften forbi tilhengeren.
12. Deksel som tetter mellomrommet mellom hytta og tilhenger.
13. Deksel som tetter mellomrommet mellom hytta og tilhenger.
14. Paneler som fyller tomrom i forbindelse med innfesting av tilhenger.

4.1.2 Rullemotstand

I tillegg til luftmotstanden, må også rullemotstanden overkommes av den totale skyvkraften.

Rullemotstanden er et tap som oppstår når hjulene er i kontakt med underlaget. Tapet oppstår på grunn av et fenomen som kalles hysteres. Hjulet (og i liten grad underlaget) blir hele tiden deformert. Hjulet går ikke tilbake til sin opprinnelige form med en gang. I denne prosessen går energien tapt som varme. Formelen for rullemotstanden blir vist i formel 3.

$$F_R = f \cdot N \text{ der } N = m \cdot g \quad (3)$$

Der er f rullemotstandskoeffisienten som beskriver friksjonen mellom dekk og underlag. Massen (kg) til kjøretøyet er m og størrelsen på tyngdekraften (N/kg) er g . Nettsiden IMI [13] presenterer en lang liste over faktorer som kan påvirke rullemotstanden:

Luftfuktighet, veiens tilstand, hjulets diameter, lufttrykk, dekkets tilstand, last, dekktemperatur, vann i veibanen og omgivelsestemperatur.

I boken *Motorteknikk – Bilteknikk* [7] blir det presentert en formel som kan brukes for å estimere rullefriksjonskoeffisienten til tunge kjøretøy. Årsaken til at rullefriksjonsfaktoren er mindre hos tunge kjøretøy enn for lette, er at hjulene har større diameter og er konstruert med mindre elastisitet. [7]

$$f = 0,005 + 0,00002 \cdot v \quad (4)$$

Hastigheten (km/t) til kjøretøyet er v .

Eksempel: Ved en hastighet på 80 km/h blir $f = 0,005 + 0,00002 \cdot 80 = 0,0066$

Vanlige verdier for andre tilstander er samlet i tabell 4.

Tabell 4: Oversikt over typiske størrelser på rullemotstandskoeffisienten

Tilfelle	f, Rullemotstandskoeffisient
Personbil på asfalt med gummidekk	0,0010 til 0,015
Personbil på grus med gummidekk	0,02
Personbil på jord med gummidekk	0,05
Stålhjul på skinner	0,001-0,002

Alle dekkutsalgs er pålagt blant annet å merke alle dekk med rullemotstanden, se figur 5. Rullemotstanden graderes fra A-F. Der A er lav rullemotstand og F er høy. Verdier for rullemotstandsgraderingen er gitt i tabell 5. Verdiene i tabellen er hentet fra *European Tyre & Rubber Manufacturers Association* (ETRma) [14].

Tabell 5: Rullemotstandskoeffisient ut fra rullemotstandsgradering

Gradering	RCC* [N/kN]	f
A	4	0,004
B	4,1-5,0	0,0041-0,005
C	5,1-6,0	0,0051-0,006
D	6,1-7,0	0,0061-0,007
E	7,1-8,0	0,0071-0,008
F	> 8,1	>0,0081

* Rolling Resistance Coefficient

Rullemotstanden er gitt med formel 5.

$$F_R = RCC \cdot m \cdot g$$

(5)

Eksempel: En 18 tonns lastebil med dekk gradert med rullemotstand C får følgende rullemotstand:

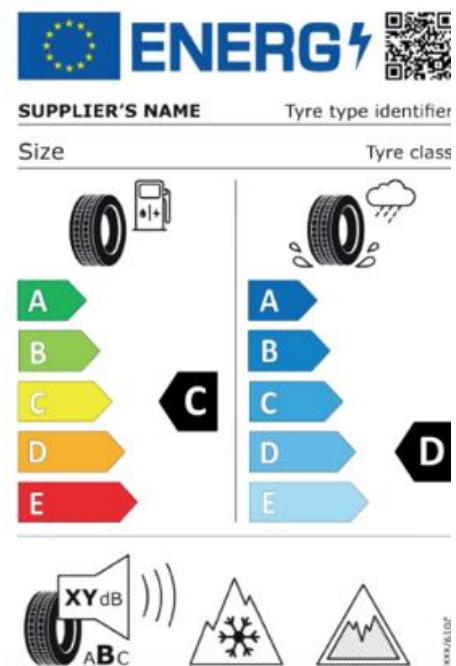
$$F_R = 6 \frac{N}{kN} \cdot 18000kg \cdot 9,81 \frac{N}{kg} = 1059 N$$

Sammenlignet med formel 4 ved 60 km/t:

$$f = 0,005 + 0,0002 \cdot 60 = 0,0062$$

$$F_R = 0,0062 \cdot 18000kg \cdot 9,81 \frac{N}{kg} = 1095 kN$$

Estimeringsformelen (formel 4) stemmer godt overens med et lastebildekk med rullemotstandsgradering D (tabell 5).



Figur 5 - Dekketikett – Feltet for rullemotstand er graderingen A-E til venstre - Kilde: Goodyear [45]

4.1.3 Formelverk for estimering av rulle­motstandskoeffisient og luft­motstandskoeffisient
 I *Grunnlag i drivverk og drivkraftteori* av Geir Terjesen [11] blir det presentert en testprosedyre for hvordan C_D og f kan estimeres ved praktisk testing. Testprosedyren går ut på å kople kjøretøyet i fri på en flat veistrekning ved ulike hastigheter, for så å ta tiden på hvor lang tid kjøretøyet bruker på å retardere. For eksempel fra 25 m/s til 20 m/s og 10 m/s til 5 m/s. Det er nødvendig å teste to hastighetsspenn (a og b). Formel 6-11 viser formelverket.

Luft­motstandskoeffisient, C_D

$$a_a = \frac{v_{a1} - v_{a2}}{t_a} \tag{6}$$

$$a_b = \frac{v_{b1} - v_{b2}}{t_b} \tag{7}$$

$$v_a = \frac{v_{a1} + v_{a2}}{2} \tag{8}$$

$$v_b = \frac{v_{b1} + v_{b2}}{2} \tag{9}$$

$$C_D = \frac{m \cdot (a_a - a_b)}{\frac{\rho_{Luft} \cdot A \cdot (v_a^2 - v_b^2)}{2}} \tag{10}$$

Rulle­friksjonskoeffisient, f

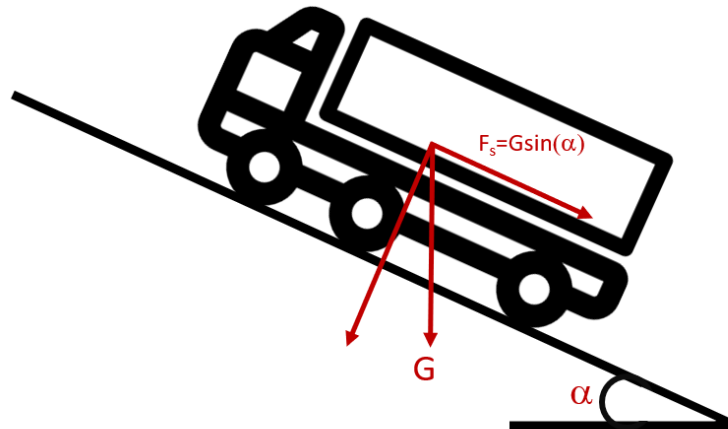
$$f = \frac{a_a \cdot v_b^2 - a_b \cdot v_a^2}{g \cdot (v_b^2 - v_a^2)} \tag{11}$$

4.1.4 Stignings­motstand

Luft­motstand og rulle­motstanden er de to største motstandene som må overkommes for et kjøretøy som kjører med konstant fart. Hvis kjøretøyet skal kjøre i motbakke, må tyngdekraften også overkommes. Stignings­motstanden beskrives slik:

$$F_S = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \tag{12}$$

I formelen er m massen til kjøretøyet (kg), g er tyngdekraften (N/kg) og α er vinkelen mellom stigningen og horisontalaksen, se figur 6.



Figur 6 -Stigningsmotstanden på en lastebil

I Norge er det normalt å oppgi stigningen i prosent på trafikkskilt. Da ser formelen slik ut:

$$\text{Stigning}(\%) = 100 \cdot \tan(\alpha)$$

(13)

For eksempel hvis stigningen er oppgitt som 10% vil vinkelen være

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{10}{100}\right) = 5,71^\circ$$

100% stigning tilsvarer 45° vinkel.

4.1.5 Akselerasjonsmotstand

Det er ikke like åpenbart som de foregående motstandene, men akselerasjonsmotstanden må også bli tatt hensyn til. Det er to typer akselerasjon som inngår i den totale akselerasjonsmotstanden.

Lineær/translatorisk akselerasjon

Den lineære akselerasjonsmotstanden er avhengig av kjøretøyets masse og akselerasjon. Den beskrives med Newtons 2. lov:

$$F_{A,l} = m \cdot a$$

(14)

Roterende akselerasjon

Når et kjøretøy akselererer, er det mange roterende deler som må akselereres/spinnes opp. Denne operasjonen krever en kraft, eller rettere sagt et moment. I drivkraftkompendium i forbindelse med kjøretøysopplæringen ved NMBU [11] ble det presentert følgende formel:

$$F_{A_\omega} = \frac{T}{R} = \frac{I \cdot \alpha}{R} \quad (15)$$

I formelen representerer I massetregghetsmomentet (kgm^2) til alle roterende deler i kjøretøyet. For eksempel akslinger, hjul og universalledd. α er vinkelakselerasjonen (rad/s^2) til alle roterende komponenter. R er radiusen til drivhjulene (m). T er dreiemomentet (Nm).

Dersom $\alpha = \frac{a}{R}$ kan uttrykket for den roterende akselerasjonen skrives slik:

$$F_{A_\omega} = a \cdot \frac{I}{R^2} \quad (16)$$

På grunn av at de ulike roterende komponentene roterer om ulike akser, må det settes opp et uttrykk for ekvivalent total translatorisk masse. Det kan gjøres med formel 17.

$$m_{ekv} = m_{kj\ddot{o}ret\ddot{o}y} + \frac{I_{hjul} + I_{me} \cdot i_d^2 + I_M \cdot i_{tot}^2}{R^2} \quad (17)$$

I formelen er I massetregghetsmomentet til de roterende komponentene. Prefiks **me** beskriver tregghetsmomentet til alle komponenter mellom motoren og drivhjulene. **M** er for motoren. Symbol i representerer utvekslingsforholdet i differensialen (**d**) og det totale utvekslingsforholdet til drivverket (**tot**). R er radiusen (m) til drivhjulene.

Total akselerasjonsmotstand

Den totale akselerasjonsmotstanden blir de to komponentene summert:

$$F_A = F_{A_l} + F_{A_\omega} = m \cdot a + \frac{I \cdot \alpha}{R} = a \cdot m_{ekv} \quad (18)$$

For personbiler er det typisk at m_{ekv} er rundt 1,05 ganger større enn m i høyeste gir og rundt 1,25-1,5 ganger større i laveste gir. [11] For fossildrevne lastebiler kan m_{ekv} være over 2 ganger så stor som m . Dette skyldes behovet for høyt dreiemoment fra start, dermed er utvekslingene svært høye. [11]

Elektriske lastebiler har vanligvis lavere utveksling fra start fordi de elektriske motorene leverer høyt dreiemoment, dette gjør at m_{ekv} for elektriske lastebiler blir mindre enn for fossile lastebiler under samme driftsforhold.

4.1.6 Total kjøremotstand og arbeidsbehov

Den totale kjøremotstanden må, som beskrevet i starten av kapittel 4.1, overvinnes av skyvekraften for at kjøretøyet skal akselerere. Ved å sette inn de utledede formlene fra de foregående kapitler ser den totale kjøremotstanden slik ut:

$$F_{hj\ddot{u}l} = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot A \cdot \rho \cdot v^2 + f \cdot m \cdot g + m \cdot g \cdot \sin(\alpha) + a \cdot m_{ekv} \quad (19)$$

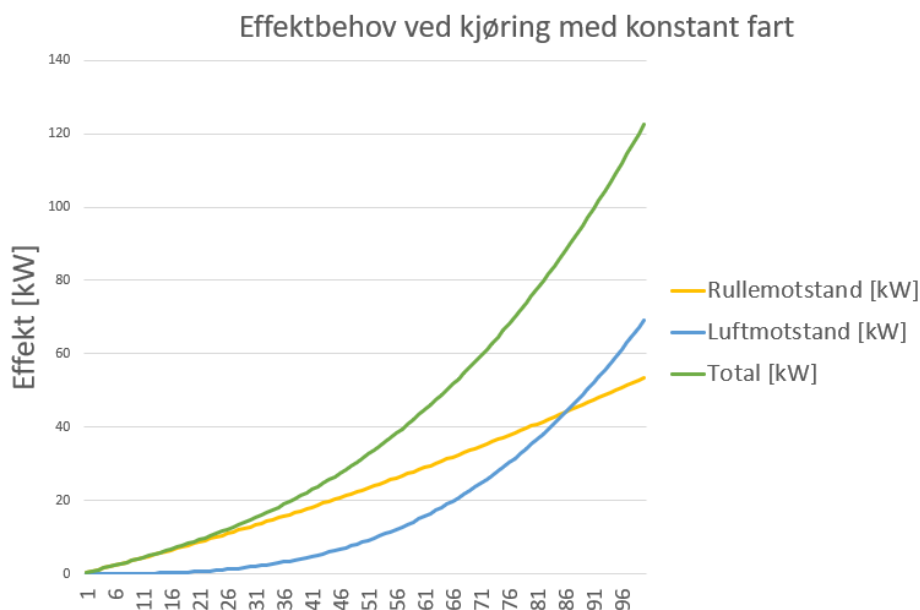
Når den totale kjøremotstanden er kjent, er det mulig å gjøre et estimat på hvor stort behovet for arbeid og dreiemomentet blir. Effekten ved drivhjulene er da gitt med formel:

$$P_{hj\ddot{u}l} = F_{hj\ddot{u}l} \cdot v = P_{motor} \cdot \eta \quad (20)$$

Symbolet v er hastigheten (m/s) til kjøretøyet relativt med underlaget. η representerer virkningsgraden til drivverket.

Regneeksempel:

For en lastebil som kjører på flat vei blir effektfordelingen vist i figur 7. Legg merke til at dette er effekten som er nødvendig for å holde kjøretøyet ved konstant fart. Ved rundt 87 km/t vil bidraget fra luftmotstanden være større enn bidraget fra rullemotstanden.

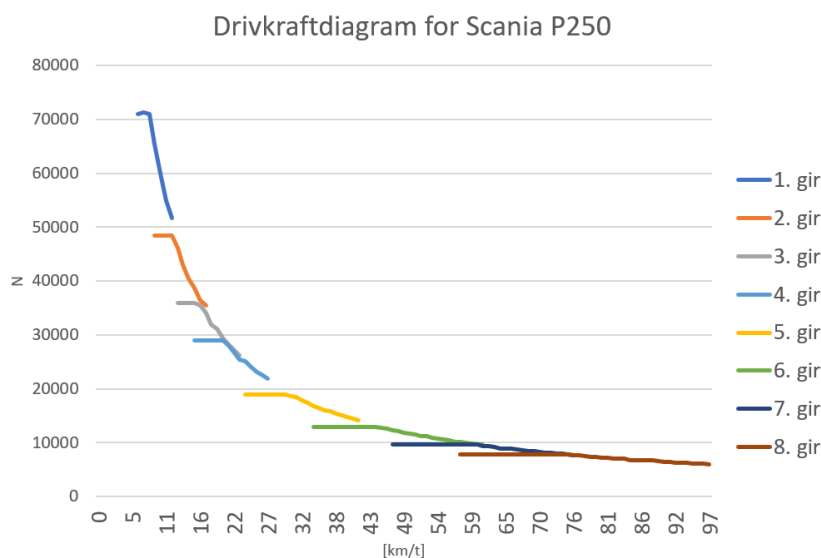


Figur 7 - Regneeksempel: Effektbehov ved kjøring med konstant fart

I regneeksempelet er lastebilens vekt satt til 28 tonn. Luftmotstandskoeffisienten er satt til 0,5, og det totale frontarealet er satt til 10 m². Rullemotstanden er beregnet med formel 4.

4.1.7 Drivkraftkurver

Et kjøretøys drivverk blir designet ut fra hva det skal brukes til. Hvilke utvekslingsforhold som skal benyttes, er avhengig av ønsket drivkraft og hastighet. Ved å sette opp et drivkraftdiagram kan man finne den beste løsningen. I drivkraftdiagrammet inngår en kurve for hvert gir som er en versjon av motorens momentkurve modifisert med utvekslingsforholdet til tilhørende gir. Figur 8 viser en drivkraftkurve for dieseldrevne Scania P250. Denne kurven blir utledet i kapittel 6.3.1.



Figur 8 – Drivkraftdiagram for lastebil

4.1.8 Drivverkets virkningsgrad

Drivverkets oppgave er å overføre den mekaniske energien fra motoren til drivhjulene. Det oppstår friksjon i alle mekaniske komponenter med bevegelige deler. Den totale friksjonen kan beskrives som det totale effekttapet i drivverket. Effekten ut blir mindre enn effekten inn. I drivverket på en lastebil med bakhjulsdrift oppstår det blant annet tap i girkassen, differensialen og i forbindelse med mellomakselen.

I girkassen oppstår det friksjon i kulelagre og mellom tannhjul. I følge x-engineer.org [15] kan effektiviteten i en generisk girkasse estimeres med følgende formel 21:

$$\eta_{gir} = \eta_{kulelager}^{n_{kulelager}} \cdot \eta_{tannhjul}^{n_{tannhjul}}$$

(21)

η_{gir} angir den totale virkningsgraden i den tenkte girkassen. $\eta_{kulelager}$ er estimert virkningsgrad til ett kulelager. n angir antall kulelagre/tannhjul som roterer med drivverket. $\eta_{kulelager}$ er virkningsgraden til to tannhjul i kontakt. Typiske virkningsgrader for henholdsvis kulelagre og tannhjul er 0,99 og 0,98 [15]. For en typisk girkasse der det er fire kulelagre og ett tannhjulpar i drift, blir virkningsgraden da:

$$\eta_{gir} = 0,99^4 \cdot 0,98^1 = 0,94 \quad (22)$$

I realiteten vil ikke virkningsgraden være konstant, men avhengig av blant annet temperatur på giroljen og turtallet. [15]

I forbindelse med mellomakselen er det minst to universalledd der det vil oppstå friksjon. Den typiske virkningsgraden for universalledd er 0,99. [15] Dette gir følgende virkningsgrad:

$$\eta_{ma} = 0,99^2 = 0,98 \quad (23)$$

I realiteten er virkningsgraden også her avhengig av flere faktorer. Den største faktoren er vinkelen mellom foraksel og bakaksel. Jo mindre vinkelen er, jo høyere er virkningsgraden. [15]

I differensialens tannhjul og kulelagre oppstår det også friksjon. Det er som oftest tre kulelagre og to tannhjul i drift. Vinkelgirene (engelsk: bevel gears) i en differensial har en virkningsgrad på rundt 0,96. [15] Dette gir følgende totale virkningsgrad:

$$\eta_{diff} = 0,96 \cdot 0,99^3 = 0,93 \quad (24)$$

Den totale virkningsgraden kan dermed bli estimert til å være:

$$\eta_{total} = \eta_{gir} \cdot \eta_{ma} \cdot \eta_{diff} = 0,94 \cdot 0,98 \cdot 0,93 = 0,86 \quad (25)$$

4.2 Elektriske motorer

For at et elektrisk kjøretøy skal ha framdrift, er det nødvendig med et system som konverterer elektrisk energi til mekanisk energi. I dette kapitlet blir det en gjennomgang av ulike typer elektriske motorer som er relevante for elektriske kjøretøy og for teori som er nødvendig for å forklare hvordan motorene fungerer.

4.2.1 Grunnleggende elektromagnetisme

For å få en forståelse for hvordan en elektrisk motor fungerer, er det essensielt å ha en grunnleggende forkunnskap om en del elektromagnetiske prinsipper. Hovedpunktene i teorien er hentet fra boken *Electric Vehicle Engineering* av Per Enge m. fl [16].

Lorentzkraften

Når noe som leder strøm blir plassert i et magnetfelt, vil lederen bli utsatt for en mekanisk kraft. Denne kraften kalles elektromagnetisk kraft eller lorentzkraften [17]. Dette fenomenet er grunnlaget for hvordan elektriske motorer fungerer. Størrelsen på lorentzkraften er avhengig av størrelsen og retningen til både det elektriske feltet og det magnetiske feltet. I 1895 formulerte den nederlandske fysikeren Hendrik Lorentz følgende formel for kraften som virker på en elektrisk ladd partikkel.

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (26)$$

Som vist i likningen så er kraften \mathbf{F} blant annet lik q ganger \mathbf{E} . q er en skalar uten retning, det vil si at retningen på kraften F er lik retningen på det elektriske feltet E . Vi kan derfor se vekk fra den komponenten og bare rette søkelyset mot den delen som er avhengig av magnetfeltet. Det er denne komponenten som er viktigst når det er snakk om motorer, fordi den er størst og dermed påvirker kraften mest. Se formel 27.

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (27)$$

$\vec{v} \times \vec{B}$ er kryssproduktet mellom hastighetsvektoren og magnetsfeltvektoren. Det vil si at retningen til kraften vil stå ortogonalt på både hastighetsretningen og retningen til magnetfeltet. Denne betraktningen er basert på høyrehåndsregelen. Når pekefingeren peker i retning av hastigheten og langefingeren peker i retningen til magnetfeltet vil tommelen peke i retning av lorentzkraften, se figur 9.

Dermed blir det som i figur 10. Magnetfeltet peker ut av siden og er markert med **B**. Den elektriske ladningen entrer magnetfeltet med ladning **q** og hastighet **V**. I det partikkelen treffer feltet vil lorentzkraften dra partikkelen mot høyre slik at banen blir en sirkel. Når det er snakk om motorer er det ikke individuelle partikler det er snakk om, men ledninger som leder strøm. Altså mange partikler på en gang som ledes gjennom en ledning. Den største kraften som virker på en rett ledning er gitt med formel 28:

$$F = B \cdot l \cdot I$$

(28)

Hvor **F** er kraften (N) som virker på ledningen, **B** er flukstettheten (T) til magnetfeltet, **l** er lengden [m] på ledningen og **I** er strømmen [A] i ledningen.

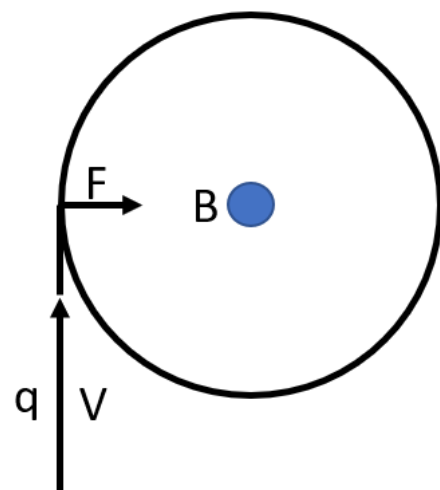
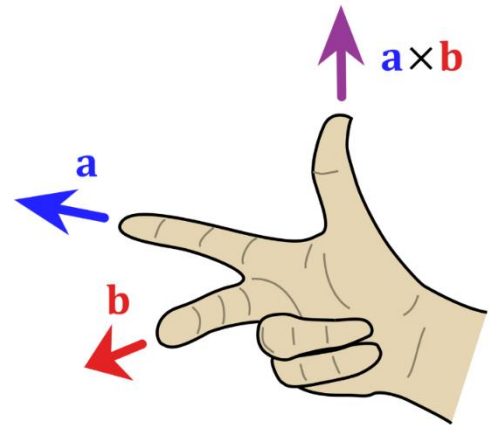
Coulombs lov

Neste fenomen som er nødvendig å ha forkunnskap om for å forklare hvordan elektriske motorer fungerer, er Coulombs lov. Coulombs lov omhandler den elektriske kraften mellom to elektriske ladede objekter [18].

Formelen ser slik ut:

$$F = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2 \hat{r}}{r^2}$$

Figur 9 - Høyrehåndsregelen Lisens: [CC BY SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)

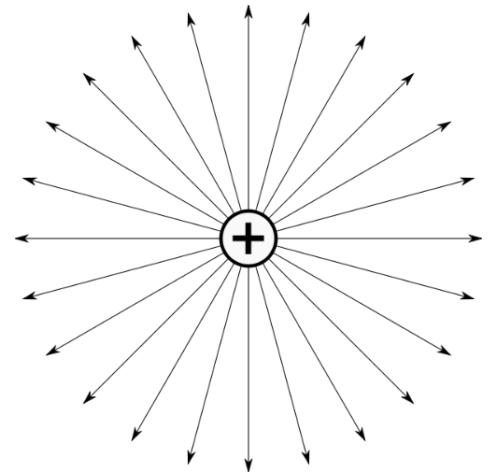


De ladde partiklene genererer også elektriske felt, som vil påvirke Lorentzkraften fra forrige avsnitt. Dette elektriske feltet (Newton/Coulombs) kan beskrives ved å dele begge sider av likning 29 på ladningen til en av partiklene. Ved å dele hver side på q_1 vil uttrykket beskrive det elektriske feltet som blir generert av den andre ladde partikkelen, q_2 :

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_1} = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q_2 \hat{r}}{r^2}$$

(30)

Faktorene som inngår i likningen er ladningene q_1 og q_2 (Coulomb), avstanden mellom partiklene r (m). \hat{r} beskriver retningen til ladningen, det er en enhetsvektor med størrelse 1 som peker fra den ene ladningen til den andre. Hvis begge ladningene har samme fortegn vil de frastøte hverandre, da er \mathbf{F} negativ. Hvis ladningene har motsatt fortegn, vil de tiltrekke hverandre. ϵ_0 er den «elektriske konstanten» som beskriver tomromspermeabiliteten, også kalt permeabilitet i vakuum. [19] Ladningene fra en partikkel vil spre seg som i figur 11. Dette elektriske feltet vil påvirke hvordan en rotor i en elektrisk motor oppfører seg, fordi feltet inngår i formelen for lorentzkraften.



Figur 11 - Elektrisk felt fra en ladd partikkel

Biot-Savarts lov

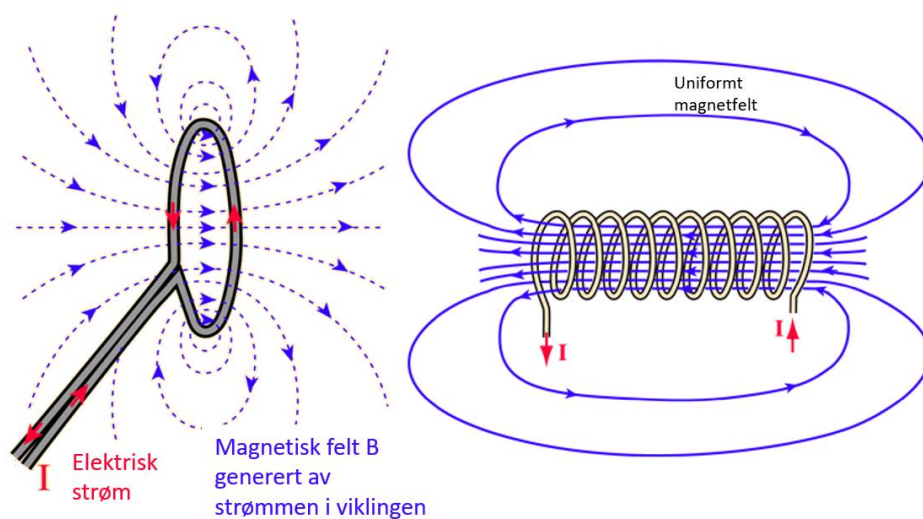
En ledning som leder strøm blir som forklart tidligere, utsatt for en kraft fra omkringende magnetfelt. I tillegg til denne kraften, vil ledningen generere sitt eget magnetfelt. Dette fenomenet blir forklart med Biot-Savarts lov. Formelen ser slik ut:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$$

(31)

Endringen i magnetfeltet \vec{B} er avhengig av den elektriske konstanten μ_0 og størrelsen på strømmen i ledningen I . r betegner avstanden fra der magnetfeltet måles og til ledningsstykket $d\vec{l}$.

Dette er for ledninger som er rette. Når det er snakk om motorer er det viktigere å se på ledninger som er kveilet sammen i spoler. I figur 12 kommer magnetfeltet som blir generert av strømmen i ledningen, tydelig frem. Legg merke til hvordan det blir når flere løkker blir stablet oppå hverandre. Da blir magnetfeltet nærmest uniformt i midten.

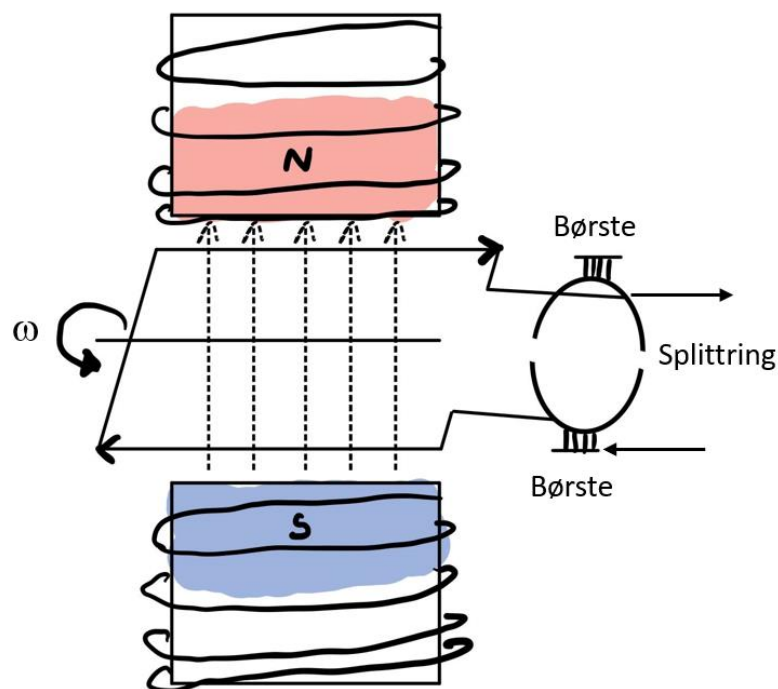


Figur 12 – Figuren viser hvordan magnetfeltet \vec{B} brer seg rundt en vikling og flere viklinger. Kilde til figur: Georgia State University [39]

I elektriske motorer kan det benyttes slike stablede spoler for å generere et magnetfelt. I midten av spolene er det som oftest en kjerne av jern. Dette er fordi magnetfelt blir mye kraftigere i jern enn i vakuum.

4.2.2 DC-motor

Nå er grunnlaget for å forstå hvordan elektriske motorer fungerer lagt. På figur 13 er det en forenklet modell av en DC-motor (Direct Current/likestrøm) med børster. Spolene med jernkjernen står for magnetfeltet. Magnetfeltet er markert med stiplede piler. Spolene er en del av statoren. Motorens rotor består av den rektangulære ledningen. Det er denne delen av motoren som roterer. Når det går strøm gjennom ledningen, vil ledningen bli påvirket av magnetfeltet på grunn av Lorentzkraften. Lorentzkraftene fra hver side av ledningen fører til at ledningen roterer på grunn av et dreiemoment, T , med vinkelhastigheten ω . Når ledningen har rotert en halv runde, vil i utgangspunktet Lorentzkraften fra magnetfeltet prøve å rotere ledningen tilbake igjen. Derfor er det nødvendig å



Figur 13 - Forenklet modell av elektrisk motor

endre retningen på strømmen hver gang ledningen har rotert 180° . For at rotoren skal rotere i ønsket retning (mot klokken), må strømmen i toppen av rotoren alltid ha retning mot høyre, og strømmen i bunnen må alltid ha retning mot venstre. Denne operasjonen blir gjort ved hjelp av en kommutator, i dette tilfellet er det «splittringen». Kommutatoren endrer strømmens retning slik at rotoren roterer. Strømmen føres inn via børstene med en konstant retning. Det vil si at strømmen i øvre del av splittringen alltid vil ha retning mot høyre, og strømmen i nedre del vil ha retning mot venstre. Hver gang rotoren roterer vil børstene være i kontakt med forskjellige deler av splittringen slik at strømmen alltid strømmer i ønsket retning og motoren roterer.

Basert på loven om Lorentzkraften kan likningen for kraften rotoren blir utsatt for på en av sidene skrives slik:

$$\vec{F} = \vec{I} \cdot l \times \vec{B}$$

(32)

Den største kraften rotoren blir utsatt for inntreffer når den rektangulære ledningen står vinkelrett på spolene. Da vil kraften være like stor på begge sidene. Kraften kan skrives slik:

$$F = 2 \cdot I \cdot l \cdot B$$

(33)

I virkeligheten vil rotoren være satt sammen av mange (**n**) viklinger. Formelen blir slik:

$$F = 2 \cdot n \cdot I \cdot l \cdot B$$

(34)

Det totale dreiemomentet kan skrives som kraft ganger radius. Det vil si at når lorentzkraften er størst kan dreiemomentet skrives slik:

$$T = 2 \cdot n \cdot I \cdot l \cdot B \cdot r$$

(35)

Magnetisk fluks (**Φ**) blir beskrevet med arealet ganget med styrken på magnetfeltet. I dette eksempelet er **A** lik lengden på rotoren ganger diameteren (**2r**). Dermed kan formelen for dreiemomentet skrives om slik:

$$T = n \cdot I \cdot \Phi$$

(36)

Det er vanlig å erstatte n med motorkonstanten (**K_m**). Dette er en konstant som tar hensyn til antall viklinger i rotor og andre feilkilder. Endelig formel ser da slik ut:

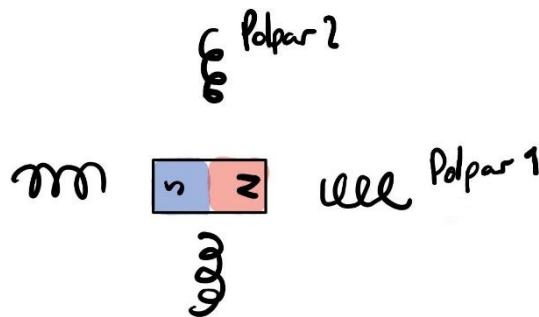
$$T = K_m \cdot I \cdot \Phi$$

(37)

Dette er den enkleste form for elektrisk motor. I dagens elektriske kjøretøy er det ikke like enkle konstruksjoner, selv om det grunnleggende prinsippet for hvordan motoren roterer er det samme.

4.2.3 Børsteløs DC-motor

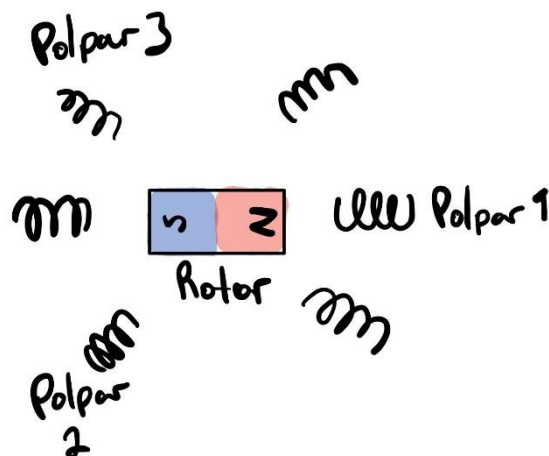
I en børsteløs DC-motor er det kun prinsippet om hvordan strømmen endrer retning som er forskjellig fra en motor med børster. Statoren består av flere spoler av samme type som var i motoren med børster. Rotoren derimot består av en permanent magnet. Etter hvert som rotoren roterer blir de ulike spolene skrudd av og på slik at magneten hele tiden trekkes i den retningen den skal rotere. Børstene og kommutatoren blir erstattet med en inverter som regulerer hvilke polpar som skal være magnetisert.



Figur 14 - Forenklet modell av en børsteløs DC-motor

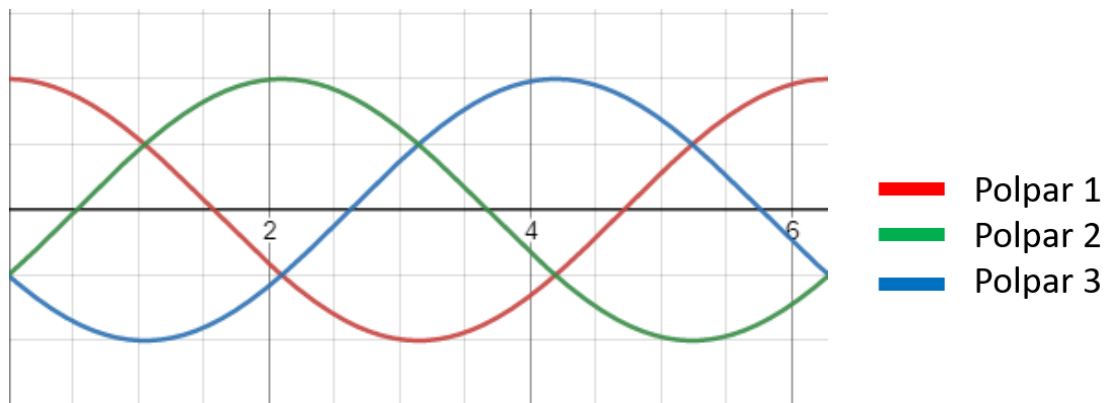
4.2.4 AC-motor

En børsteløs AC-motor (alternating current/vekselstrøm) bygger på samme prinsipp som en børsteløs DC-motor. I DC-versjonen blir retningen på strømmen snudd ved hjelp av en inverter. Så hvorfor ikke bare bruke vekselstrøm, som allerede har vekslende retning på strømmen? Se for deg en børsteløs DC-motor med tre polpar. Rotoren er fortsatt en permanentmagnet, som vist i figur 15. Motorens styreenhet setter strøm til hvert polpar. Strømmen i hvert polpar er faseforskjøvet med 120° slik at



Figur 15 - Forenklet modell av AC-motor

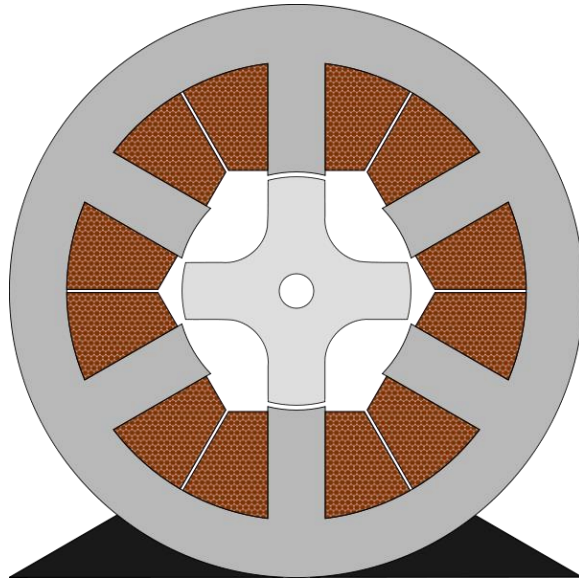
magnetfeltet polparene generer vil trekke rundt rotoren. Det vil si at når polpar 1 starter ($t=0$) med maks strøm i den ene retningen, vil polpar 2 og 3 starte med like mye strøm i motsatt retning. Magnetfeltet generert av polpar 1 vil avta med tiden, samtidig som magnetfeltet fra polpar 2 øker. Se figur 16. Denne syklusen inntreffer en gang hver runde motoren spinner. Dette vil trekke rotoren rundt på samme måte som ved bruk av en kommutator på DC-motoren med børster. I og med at rotoren roterer synkront med magnetfeltet som blir generert av statoren, er det vanlig å kalle denne typen AC-motorer for synkronmotorer. [20]



Figur 16 - Strømretning i elektrisk motor med tre polpar

4.2.5 Reluktansmotor

I en reluktansmotor er rotoren laget av et magnetisk materiale, for eksempel jern. Det er et materiale som en magnet vil trekkes mot. Rotoren har færre poler enn statoren. En vanlig konfigurasjon er 4 poler på rotor og 6 på stator. Dette fører til at når to polpar på rotoren er justert likt som to poler på statoren, er det et polpar på rotoren som ikke er jevnt med motstående poler på statoren. Disse polene på statoren vil da få satt en strøm som trekker på rotoren, slik at den roterer. Fenomenet som gjør at rotoren trekkes rundt, kalles magnetisk reluktans. Derfor kalles denne motortypen reluktansmotor. Tesla benytter en motor som kalles Permanent Magnet Reluctance Motor (permanentmagnet reluktansmotor). Dette er en motor med en stator som er en blanding av spoler og permanentmagneter. Dette er gjort for å glatte ut rotasjonen til motoren. Hvis dette ikke ble gjort var rotasjonsbevegelsen for hakkete. [21]



Figur 17: Oppsettet til en reluktansmotor med fire poler på rotor og seks på stator Lisens: Wikimedia Commons

4.2.6 Induksjonsmotor

For å forstå hvordan induksjonsmotorer fungerer, er det essensielt å ha forkunnskaper om Faradays induksjonslov.

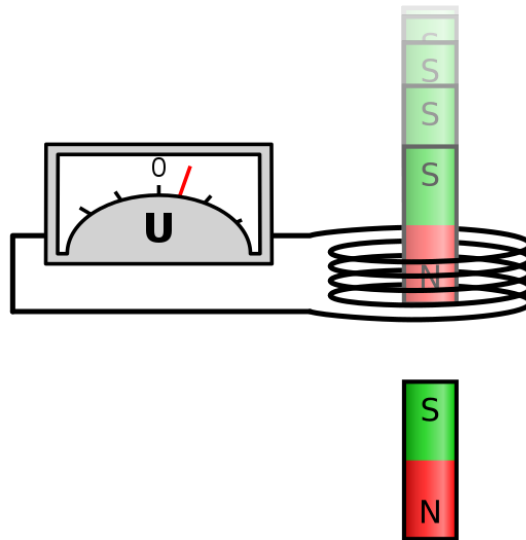
Faradays induksjonslov

Faradays induksjonslov er en lov utarbeidet av Michael Faraday i 1831. Han oppdaget et fenomen der det oppstod en spenning i en spole hvis magnetfeltet som omringet spolen, ble endret. Denne spenningen kalles indusert spenning [18]. Se figur 18 for et eksempel av hvordan magnetfeltet kan endres slik at det blir indusert en spenning i spolen. Formelen ser slik ut:

$$V = -\frac{d\Phi}{dt}$$

(38)

V er den induserte spenningen (volt) og Φ er den magnetiske fluksen.



Figur 18 – Modell som viser hvordan spenning induseres i spolen når en magnet slippes gjennom spolen Kilde: MikeRun.
Lisens: Wikimedia Commons

Dette fenomenet kan brukes til å konvertere elektrisk energi til roterende energi. Det kan også benyttes motsatt vei, til å regenerere strøm. Dette gjør at elektriske kjøretøy kan ha regenererende bremsing. Den magnetiske fluksen Φ kan skrives om til det magnetiske feltet ganget med arealet det går gjennom. Da kan formelen skrives slik:

$$V = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d(\vec{B} \times \vec{A})}{dt} \quad (39)$$

Ved hjelp av denne formelen er det mulig å utlede et uttrykk som beskriver spenningen som induseres i viklingene i en induksjonsmotor. Formelen ser slik ut:

$$V = K_m \cdot \Phi \cdot \omega_r \quad (40)$$

V er spenningen som induseres i viklingene, K_m er motorkonstanten som tar høyde for antall viklinger og andre faktorer som er individuelt forskjellig for hver type motor. Φ er den magnetiske fluksen (Wb) og ω_r er vinkelrotasjonshastigheten (rad/s).

Induksjonsmotor vekselstrøm

En induksjonsmotor som drives av vekselstrøm, er bygd opp på samme måte som en vanlig vekselstrømsmotor (beskrevet i kapittel 4.2.4). I disse motorene er det et roterende magnetfelt som drar rundt rotoren laget av en permanentmagnet. I stedet for at rotoren består av en permanentmagnet, består den nå av spoler med mange viklinger. Når magnetfeltet roterer rundt rotoren, vil det induseres en spenning i ledningene som igjen vil føre til at viklingene blir påvirket av lorentzkraften. I følge Faradays lov vil retningen på den induserte spenningen være omvendt av retningen til endringen i det magnetiske feltet. I motsetning til de andre motorene som har blitt presentert tidligere, vil ikke en induksjonsmotors rotor rotere synkront med magnetfeltet. Rotoren vil ligge litt bak, det er dermed ikke en synkronmotor. Induksjonsmotoren hadde ikke fungert hvis rotor og stator roterte helt likt. Denne forskjellen i rotasjonshastighet kalles slipp (eng: slip) [22] Formel 41 beskriver slippet i en asynkronmotor. Symbol n_s står for synkronhastigheten og n er hastigheten til rotoren.

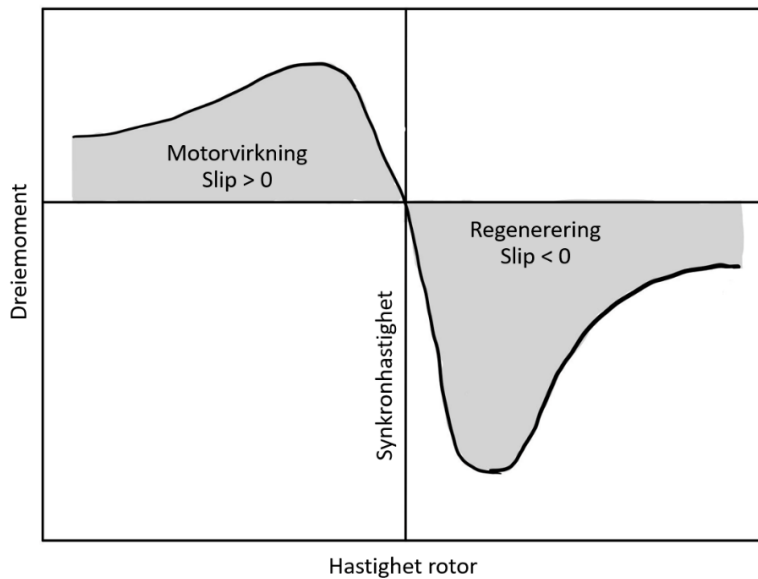
$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100\%$$

(41)

Ifølge Wildi [22] er slippet i en motor 100% når rotoren er låst fast, og når motoren har så godt som ingen last, er slippet svært lite. Dette er fordi når motoren påføres en last, vil rotoren holdes igjen av lasten. Magnetfeltet roterer like fort uansett, fordi det kun er avhengig av frekvensen på strømkilden. Hvis rotasjonshastigheten til rotoren er raskere enn rotasjonshastigheten til magnetfeltet, vil motoren fungere som en generator. Dette kan for eksempel inntreffe når et kjøretøy triller ned en bakke og bremses.

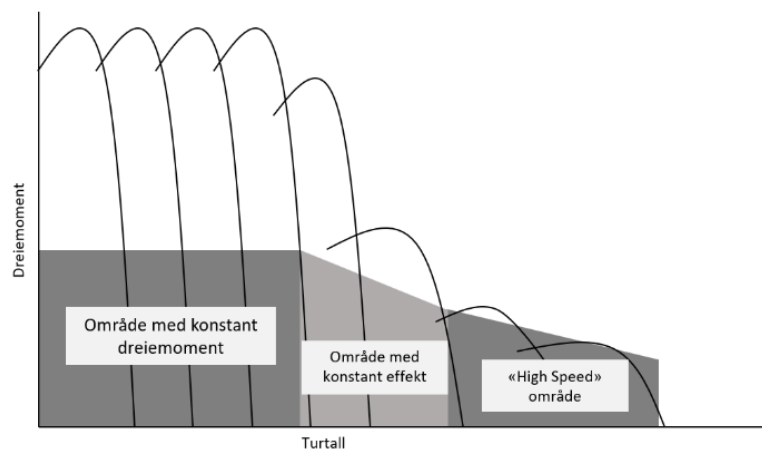
4.2.7 Motoreffekt

Figur 19 viser sammenhengen mellom dreiemoment og turtall for en typisk asynkron induksjonsmotor. Legg merke til hvordan motoren fungerer som en motor når rotorhastigheten er lavere enn synkronhastigheten, altså hastigheten til magnetfeltet som er styrt av frekvensen på strømmen. Dreiemomentet er null når rotoren har samme hastighet som synkronhastigheten. Høyre halvdel av figuren viser hvordan dreiemomentet ser ut når motoren arbeider i regenereringsområdet. Her er slippet over null.



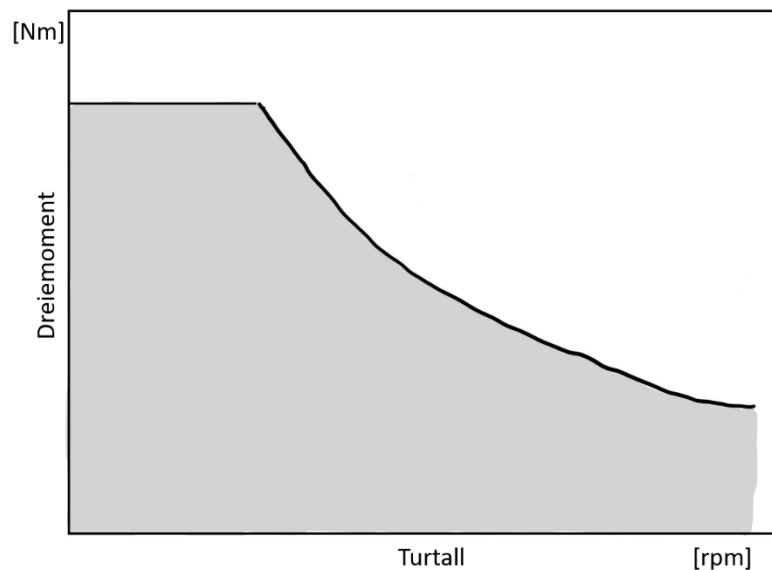
Figur 19 – Dreiemomentkurve for en asynkronmotor

Ved å endre frekvensen på vekselstrømmen kan synkronhastigheten reguleres, og det får følger for dreiemomentet og rotorhastigheten. For en induksjonsmotor vises endringen i frekvens i figur 20. Hver linje i grafen representerer ny frekvens.



Figur 20 – Dreiemomentkurve ut fra endring i frekvens for motorstyring. Grafen er inspirert av graf fra what-when-how.com [40]

I en reell driftssituasjon vil dermed dreiemomentkurven se omtrent ut som i figur 21. Her kommer likheten mellom figur 20 og 21 tydelig frem.

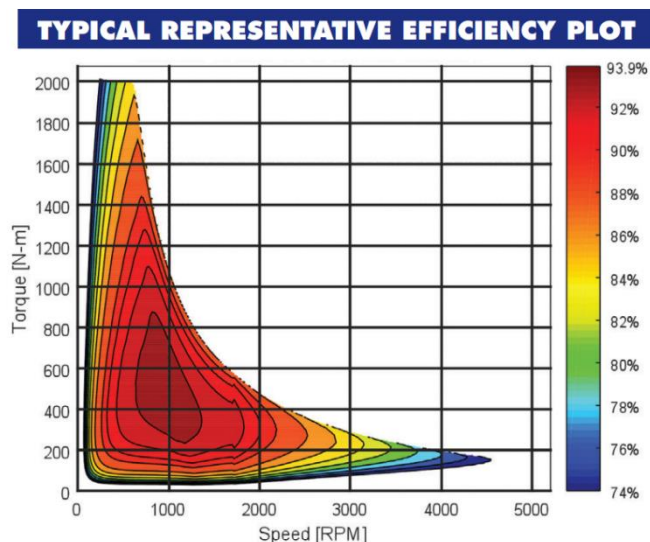


Figur 21 - Typisk momentkurve for elektrisk motor

Det flate området på starten av grafen er begrenset av motorens maksimale dreiemoment. Det kurvede området i grafen er begrenset av motorens totale effekt. Momentkurven vil ha tilnærmet samme utforming uansett om det er en asynkron eller synkron motor.

4.2.8 Effektivitet i elektrisk motor

Når en elektrisk motor omdanner elektrisk energi til mekanisk energi, er det alltid en form for tap. En elektrisk motor er svært mye mer effektiv enn en motor drevet av diesel eller bensin, da effektiviteten kan være opp mot 100%. I en fossildrevet motor derimot, går store deler av energien over til varme. Wildi [22] forklarer at tapet av effekt foregår innad i motoren og forårsaker en økning i temperatur og en reduksjon i effektivitet. I en roterende elektrisk motor foregår det to typer tap: elektrisk tap og mekanisk tap. Det mekaniske tapet skjer på grunn av friksjon i kulelagre, børster og andre komponenter som er i fysisk kontakt med hverandre. Disse tapene øker i takt med rotasjonshastigheten. De elektriske tapene består av følgende tap: tap i viklinger (kobbertap), børstetap og jerntap. Tapet i vikingene forårsakes av



Figur 22 Effektkurve til en HVH410-motor designet for tunge kjøretøy [46]

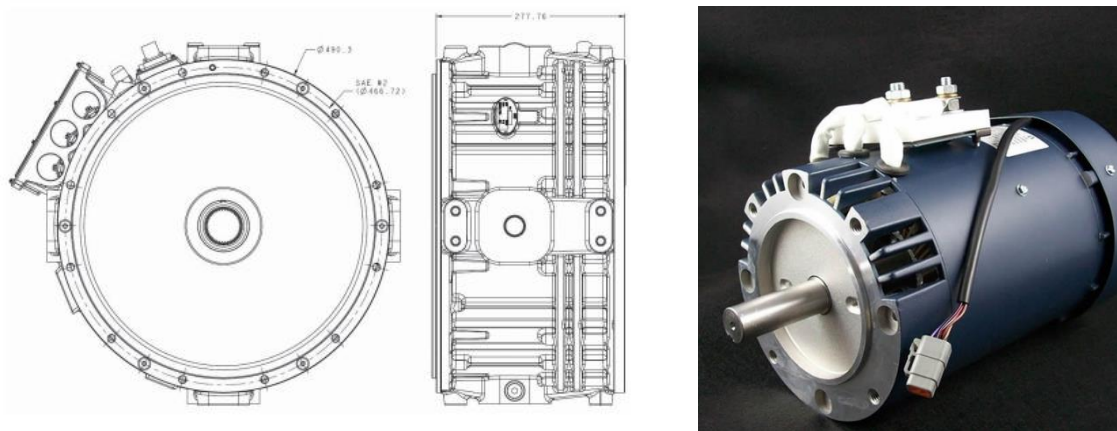
varmgang i forbindelse med strømføringen. Ifølge *Elektriske maskiner og omformere* av P. Vaske og F. Moeller [23], er tapene forårsaket av hysteresearbeid i forbindelse med ommagnetisering.

Elektriske motorer har ulik effektivitet avhengig av driften, se figur 22. Ifølge Wolff m. fl [1] har ulike typer elektriske motorer forskjellig effektivitetskarakteristikk. For eksempel så har permanentmagnetmotorer best effektivitet ved lavere turtall og høyt dreiemoment. I motsetning til induksjonsmotorer som har høyest effektivitet ved høyt turtall. På grunn av forskjellig dreiemoment fra tunge kjøretøy, sammenliknet med lettere personbiler, må tunge kjøretøys elektriske motorer konstrueres noe annerledes. I praksis resulterer dette i statorer med stor diameter og kort lengde. Disse motorene formes mer som en disk og har ikke samme diameter-lengde-forhold som elektriske motorer designet for lettere kjøretøy. Se figur 23 for en sammenlikning mellom elektrisk motor designet for tunge kjøretøy og lette kjøretøy. Formelen for virkningsgraden i en elektrisk motor er:

$$\eta = \frac{P_{ut}}{P_{inn}}$$

(42)

P_{ut} representerer den mekaniske effekten motoren yter. P_{inn} er den elektriske energien som konverteres i motoren.



Figur 23 – Til venstre: HVH410-150 Electric motor av BorgWarner [46] designet for høyt dreiemoment og lavere turtall. Til høyre: Induksjonsmotor Kilde: electricmotorsport.com [41]

4.2.9 Ulike motorers karakteristikk

I boken *Automotive Handbook* [24] som er gitt ut av BOSCH, presenteres følgende tabell 6 for å sammenlikne ulike typer elektriske motorer. Her kommer ulike fordeler og ulemper tydelig frem. Det viktigste er at PMSM er godt egnet til å levere høyt dreiemoment ved lavt turtall. Dette er perfekt for lastebiler. Ulempene som trekkes frem er at PMSM er dyrere å fremstille på grunn av dyre permanentmagneter. I tillegg trekkes avmagnetisering frem som en ulempe. Hvis dette skjer, mister magnetene sine magnetiske egenskaper permanent. Da blir motoren svakere eller ubrukelig. Dette

kan oppstå hvis rotoren blir ødelagt og får sprekker på grunn av for høy mekanisk last. Det kan også oppstå på grunn av for høye temperaturer eller for høy strømstyrke. [25] Momenttettheten legges frem som veldig høy. Det vil si at motoren leverer høyt dreiemoment i forhold til volumet den opptar.

Tabell 6: Ulike typer elektriske motorer for elektriske kjøretøy Kilde: Bosch Automotive Handbook [24]

Teknologi	PMSM*	ESM**	Reluktansmotor	Induksjonsmotor
Funksjonsprinsipp	Synkron	Synkron	Synkron	Asynkron
Momenttetthet	Veldig stor	Veldig stor	Stor	Stor
Best effektivitet ved	Høyt moment og lavt turtall	Høyt turtall og lavt moment	Høyt turtall og lavt moment	Høyt turtall og lavt moment
Fordeler	Krever lite ekstra plass for installering Kan unngå et ekstra system for nedkjøling av rotoren	Høy effektivitet Behøver ikke mye strøm	Veldig enkelt rotordesign	Enkelt rotordesign
Ulemper	Dyre magneter Avmagnetisering Kortslutningsmotstand	Avansert omformersystem Høy varmeutvikling ved høyt turtall	Lyd	Behøver mye strøm Overoppheting av rotor

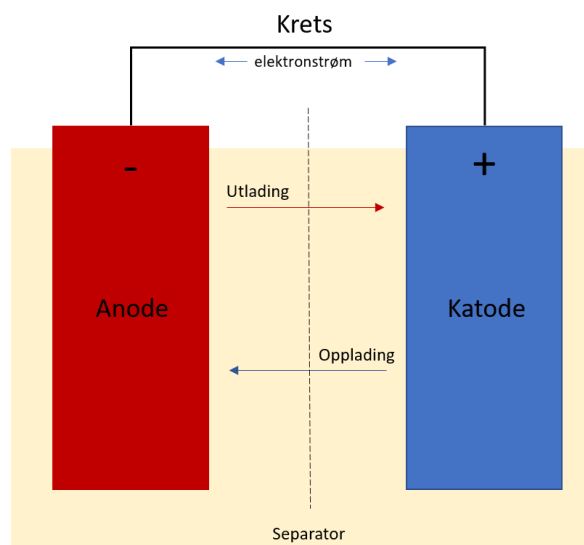
*Permanentmagnet-synkron-motor ** Elektrisk eksitert synkronmotor

4.3 Batteriteknologi

For at de elektriske motorene som er beskrevet i forrige kapittel skal ha mulighet til å drive kjøretøyene må kjøretøyene ha en form for energilagring. I tradisjonelle kjøretøy blir energien lagret i drivstofftanker, i elektriske kjøretøy lagres den i batterier. Majoriteten av elektriske kjøretøysprodusenter benytter litiumholdige batterier (Litium-Ion-batterier) [26]. I dette kapitlet blir det derfor i hovedsak lagt vekt på denne typen batteri.

4.3.1 Grunnlag for batteriteori

Et batteri kan lagre kjemisk energi og gjøre energien om til elektrisk energi. Felles for alle typer batterier er at de består av elektroder og en elektrolytt. Et typisk oppsett for en battericelle blir vist i figur 24. De to elektrodene er anoden og katoden. Katoden er positivt ladd, og anoden er negativt.



Figur 24 - Forenklet modell av en battericelle

Mellom anoden og katoden er det en elektrolytt som gjør det mulig for positivt ladde ioner å bevege seg mellom anoden og katoden. Separatoren er til stede slik at ikke anoden og katoden skal komme i kontakt med hverandre, for da vil kretsen bli kortsluttet. Når elektrodene er koblet til en krets, slik som på figur 24, kan elektroner forflytte seg mellom elektrodene.

Batterier kan deles inn i to hovedkategorier. Primærbatterier og sekundærbatterier. Primærbatterier er batterier som ikke kan lades opp igjen når de er brukt opp. Hvis det ble brukt primærbatterier i elektriske kjøretøy måtte hele batteriet byttes ut hver gang det går tomt. Derfor er det hensiktsmessig å benytte seg av sekundærbatterier som er oppladbare. Når et batteri lades opp forflyttes det elektroner fra katoden til anoden gjennom den ytre kretsen. Samtidig forflyttes det positive ioner gjennom elektrolytten. Når et batteri blir utladet, for eksempel når det gir kraft til en elektrisk motor, forflyttes elektronene og ionene motsatt vei: fra anoden til katoden.

4.3.2 Litium-ion-batteri

Et litium-ion-batteri trenger flere komponenter for å fungere. Blant annet en anode, en katode, en elektrolytt, selve kretsen og separatoren. I denne delen blir komponentene som utgjør et litium-ion-batteri, beskrevet.

Anoden

Anoden er den negativt ladde elektroden i et batteri. Anoden er som oftest laget av grafitt (C_6), men noen typer kan være laget av silikon- eller titanbaserte legeringer [2]. Det viktigste med anodemateriale er at det kan ta imot positivt ladde litiumioner (Li^+). Når batteriet lades opp «fylles» anoden med litiumioner som overføres til katoden under utlading. [2]

Katoden

Katoden i denne type batteri er laget av litiumholdige materialer. For eksempel litium-jern-fosfat (LFO, $LiFePO_4$) eller litium-kobolt-oksidi (LCO, $LiCoO_2$). Litiumkatoden er hjertet i et litium-ion-batteri. Det er hvilke materialer den er sammensatt av som bestemmer energitettheten, batterispenningen og kapasiteten til batteriet. Det er derfor i denne delen av batteriet det er mest rom for utvikling. [2] I kjøretøysindustrien består katodematerialet som oftest av et litiumoksid av noe slag, med unntak av LFO. Det er i katoden Li^+ -ionene hører hjemme. Når batteriet lades opp, blir Li^+ -ionene og elektronene overført til anoden.

Elektrolytt

Det er elektrolytten som muliggjør overføring av ioner mellom anoden og katoden. Det er viktig at elektrolytten består av et materiale som leder ioner og ikke leder elektroner. Som oftest består elektrolytten i litium-ion-batterier av litiumsalter, for eksempel litium hexafluorofosfat ($LiPF_6$). [2] I tillegg består elektrolytten av tilsetninger som skal motvirke utmatting av batteriet, litt på samme måte som bensin inneholder tilsetningsstoffer som skal ta vare på bensinmotoren.

Separator

Separatoren fungerer som en skillevegg mellom anoden og katoden. I litium-ion-batterier består separatoren som oftest av tynne, porøse materialer. Materialer som ofte blir brukt er nylon, polyetylen eller polypropylen. [27] Separatoren tillater ioner å strømme gjennom, men ikke elektroner. Elektronene tvinges derfor gjennom den elektriske kretsen.

4.3.3 Batterikarakteristikk

Batterikarakteristikken er avhengig av materialvalg, størrelse og kapasitet. Det er flere faktorer som er interessante ved valg av riktig batteri for et elektrisk kjøretøy. I denne delen blir pris, energitetthet og kapasitet beskrevet.

Pris

De siste årene har prisene på batterier til elektriske kjøretøy blitt kraftig redusert. Bloomberg estimerer prisen pr. kWh til å ha blitt redusert fra 1160 USD til 176 USD fra 2010 til 2018. [28] Dette vil si at et batteri på 400 kWh har falt fra 464000 USD til 70400 USD på åtte år. I samme artikkel estimeres batteriprisen til å falle til 62 USD innen 2030. Dette gjør at batterier til elektriske kjøretøy blir mye billigere for forbruker og produsent. De blir altså lettere tilgjengelig og har større batteripakker.

Kapasitet

Kapasiteten kan regnes som hvor mye som er «igjen» av batteriet. State of Charge (SoC) brukes ofte for denne verdien. Når SoC er 100% er batteriet fullt og 0% er batteriet helt utladet. SoC kan sammenlignes med drivstoffmåleren på et tradisjonelt kjøretøy.

Energitetthet

Energitettheten er et mål for hvor mye energi som kan lagres pr. størrelse batteri. Det er to tettheter som er relevante i forbindelse med elektriske kjøretøy. Den første er spesifikk energitetthet: energi pr. masse. Den andre er energitetthet: energi pr. volum. Enheten for disse størrelsene er henholdsvis Wh/kg og Wh/m³. Battericellene i en Tesla Model 3 har pr. 2021 en spesifikk energitetthet på 260 Wh/kg. [29]

4.4 Drivverk/Kraftoverføringssystem i tunge elektriske kjøretøy

4.4.1 Motorplassering

I dette kapitlet vil ulike metoder for å overføre kraften fra motoren til drivhjulene bli gjennomgått.

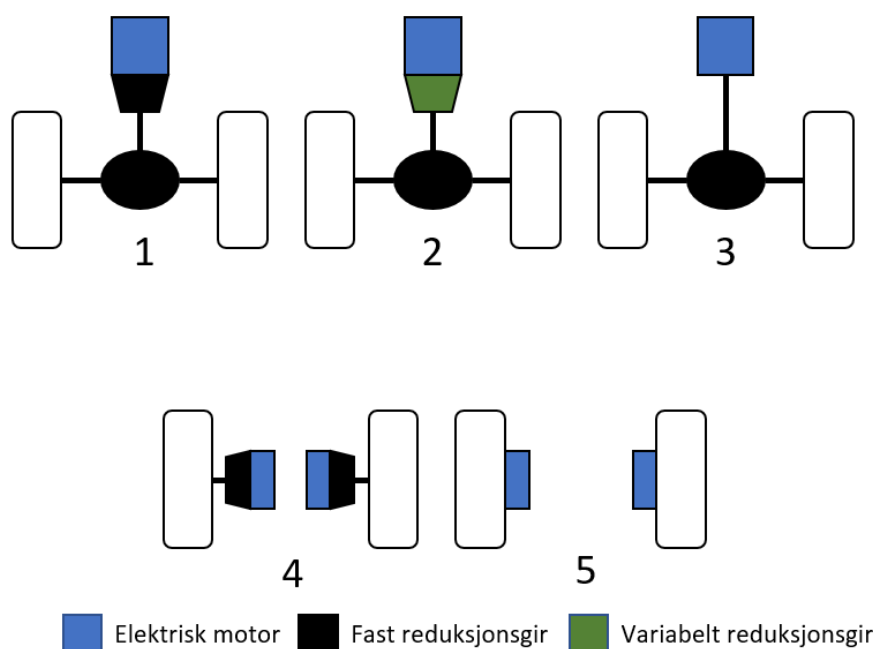
Drivverket er her det systemet som benyttes for å overføre den elektriske energien i batteriene, til dreiemomentet som gir kjøretøyet drivkraft. Drivverket kan bestå av følgende komponenter:

- Elektrisk motor
- Motorkontroller
- Reduksjonsgirkasse
- Differensial
- Navreduksjon
- Akslinger som kobler de ulike komponentene sammen

I boken Heavy-Duty Electric Vehicles [2] blir de vanligste konfigurasjonene gjennomgått. Felles for de fleste løsningene er at den elektriske motoren er plassert i midten av kjøretøyet og det er et kraftoverføringssystem mellom motor og drivhjul. En annen løsning som noen produsenter utforsker, er separate motorer som driver hvert hjul. Dette skjer ved hjelp av motorer montert direkte på navet, eller med motorer fastmontert i rammen med egen girkasse.

Et elektrisk kjøretøy trenger følgende egenskaper, som avhenger av drivverkets oppbygning:

Kjøretøyet må være i stand til å akselerere fra stillstand på en rask og jevn måte. Systemet bør også være så effektivt som mulig, altså ha så lite tap som mulig i drivverket. Dette kan oppnås med så få reduksjonsgir som mulig. De vanligste drivverkskonfigurasjonene er oppsummert i figur 25.



Figur 25 -Ulike drivverkskonfigurasjoner for elektriske kjøretøy

Konfigurasjon 1: Dette er ifølge *Heavy-Duty Electric Vehicles* [2] den vanligste konfigurasjonen i elektriske busser og lastebiler enn så lenge. Den består av en elektrisk motor i midten av kjøretøyet. Motoren er så koblet til et fast reduksjonsgir før det kobles til en differensial som overfører momentet til drivhjulene.

Konfigurasjon 2: Denne konfigurasjonen er nesten lik som 1, bortsett fra at den har en variabel girkasse. Dette gjør at den elektriske motoren kan ha et lavere krav til maks moment, fordi girkassen kan ha høyere utveksling ved lav fart. Ulempen med denne konfigurasjonen er at den er mer avansert enn alternativ 1, da denne trenger en automatisk girkasse.

Konfigurasjon 3: Den tredje konfigurasjonen består ikke av noen girkasse, her er motoren koblet direkte på differensialen. Motoren i dette tilfellet er dermed nødt til å kunne generere høyt dreiemoment ved lavt turtall.

Konfigurasjon 4: I denne konfigurasjonen drives drivhjulene av to separate motorer med tilhørende girkasse. Motorene i dette tilfellet kan ha lavere effekt enn i foregående konfigurasjoner. Utfordringer med dette tilfellet er at det trengs avansert styring for at motorene skal være synkronisert med hverandre.

Konfigurasjon 5: Denne konfigurasjonen består av spesielle motorer som er montert direkte på navet til hjulene. På engelsk kalles de «in-wheel motors». Ifølge *Heavy-Duty Electric Vehicles* [2] er dette en

konfigurasjon som ikke er vanlig for tunge kjøretøy på grunn av at de krever høyere dreiemoment. Det blir derimot mer og mer vanlig å benytte denne konfigurasjonen i personbiler og mindre elektriske kjøretøy.

I artikkelen *Influence of Powertrain Topology and Electric Machine Design on Efficiency of Battery Electric Trucks—A Simulative Case-Study* [1] utarbeidet ved det tekniske universitetet i München ble det gjort simuleringer på ulike drivverkskonfigurasjoner for å finne ut hvilket oppsett som var mest effektivt. Resultatene av simuleringene deres viste at E-force kjøretøyet var mest effektivt med en total virkningsgrad på 95%. Dette kjøretøyet ble modellert med en permanentmagnetmotor og en konfigurasjon som tilnærmet tilsvarer konfigurasjon 2. Eneste forskjellen fra konfigurasjon 2 er at E-force kjøretøyet ble modellert med to motorer i stedet for en. Lastebilen som fikk dårligst virkningsgrad i simuleringene var Nikola Tre. Simuleringene resulterte i en virkningsgrad på 86 %. Nikola Tre ble modellert med en drivverkskonfigurasjon som tilsvarer konfigurasjon 4.

4.4.2 Akselkonfigurasjon

Lastebiler kan utstyres med flere ulike akslingskonfigurasjoner. I følge Store norske leksikon [30] er det vanlig å beskrive akselkonfigurasjonen med tall adskilt med gangetegn. Det første tallet viser hvor mange hjul kjøretøyet har totalt, det siste tallet viser hvor mange hjul som har direkte drift.

Et utdrag fra listen over vanlige konfigurasjoner:

- $4 \times 2 = 2$ aksler hvorav drift på 1
- $4 \times 4 = 2$ aksler hvorav drift på begge
- $6 \times 2 = 3$ aksler hvorav drift på 1
- $6 \times 2/4 = 3$ aksler hvorav drift på 1 og styring på de 2 første
- $6 \times 2-4 = 3$ aksler hvorav drift på 1 og styring på første og siste
- $6 \times 4 = 3$ aksler hvorav drift på 2
- $6 \times 4-4 = 3$ aksler hvorav drift på første og andre og styring på første og siste
- $6 \times 6 = 3$ aksler hvorav drift på alle
- $8 \times 2/4 = 4$ aksler hvorav drift på fremre bakaksel og styring på begge foraksler
- $8 \times 2/6 = 4$ aksler hvorav drift på fremre bakaksel og styring på begge foraksler og bakre aksel
- $8 \times 4/4 = 4$ aksler hvorav drift på begge bakaksler og styring på begge foraksler
- $8 \times 4-4 = 4$ aksler hvorav drift på 2 bakaksler og styring på foraksel og bakre aksel
- $8 \times 6/4 = 4$ aksler hvorav drift på begge bakaksler og en foraksel og styring på begge foraksler
- $8 \times 6-4 = 4$ aksler hvorav drift på de 3 fremre aksler og styring på begge foraksler og 1 bakaksel

Listen er hentet fra Store norske leksikon [30].

4.5 Klassifisering av lastebiler

I Norge klassifiserer statens vegvesen lastebiler i to klasser: N2 og N3. Disse klassene representerer henholdsvis tillatt totalvekt fra 3500 kg til 12000 kg og tillatt totalvekt over 12000 kg. Lastebilene som blir studert i denne oppgaven tilhører klasse N3. [31]

4.6 utfordringer i forbindelse med arbeid på elektriske kjøretøy

Den største utfordringen i forbindelse med arbeid på elektriske kjøretøy er at det er svært høye spenninger det er snakk om i kjøretøyets elektriske anlegg. For kjøretøyene som blir studert i denne rapporten er det snakk om spenninger over 650 V og strøm med en styrke på opptil 450A. I Norge er det forskriften NEK EN 50110 som regulerer arbeid på anlegg med slike spenninger. For elektriske kjøretøy av denne klassen er det helt andre regler som gjelder når det gjelder reparasjon og vedlikehold enn på tradisjonelle dieselkjøretøy. I dette delkapittelet blir de viktigste hensynene fra denne forskriften presentert.

NEK EN 50110 – Norsk elektroteknisk norm – Sikkerhet ved arbeid i drift av elektriske anlegg

Standarden beskriver hvilke kvalifikasjoner ansatte som skal arbeide med spenning innenfor dette området må inneha og hvem som skal ha overordnet ansvar. I tillegg beskrives det hva slags verneutstyr og rutiner som skal følges. Se illustrasjonsfoto (figur 26) for hvordan et arbeidsområde der det foregår arbeid på et batteri fra en elektrisk lastebil kan se ut.



Figur 26 - Avgrenset område for arbeid på batteri fra elektrisk lastebil Kilde: Scania

5 Resultater 1: Innsamlet informasjon

5.1 Studie av elektrisk lastebil fra Scania

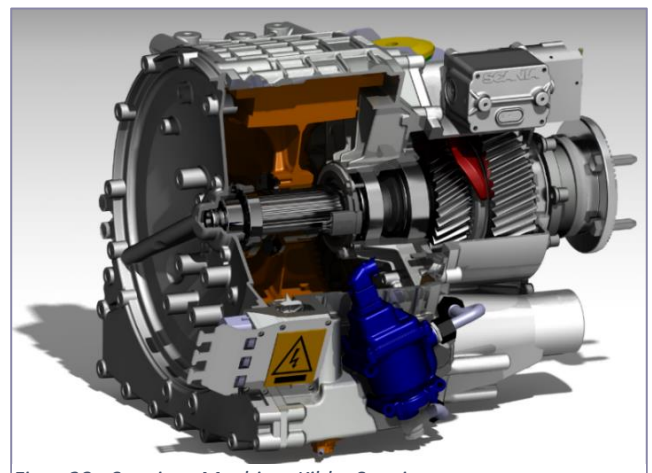
5.1.1 Generell beskrivelse av elektrisk lastebil fra Scania

I dette kapittelet blir en Scania P25 BEV (Battery Electric Vehicle) studert, se figur 27. Dette er en lastebil som i dette studiets tilfelle ble levert med en 6x2 hjulkonfigurasjon. Det vil si at kjøretøyet har tre aksler, med drift på en. Scanias elektriske lastebil leveres også med 4x2 og 6x2*4 konfigurasjon.



Figur 27 - Scania P25 Elektrisk

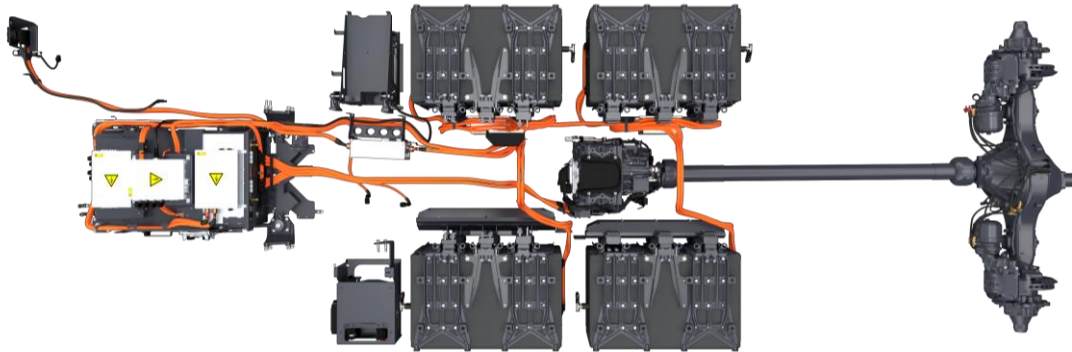
Enn så lenge tilbyr Scania kun en type drivverk på de elektriske lastebilene sine. Dette består av «eMachine», en kombinert elektrisk motor og girkasse (se figur 28). Den elektriske «maskinen» består av en permanentmagnetmotor som leverer en effekt på 295 kW 2200Nm (maks) og 230 kW 1300Nm (kontinuerlig). [32] Girkassen er montert i samme hus som motoren og har to gir. Denne kombinasjonen av motor og girkasse kaller Scania for eMachine. Girkassen fører til høyere dreiemoment over et bredere hastighetsspenn, i tillegg til å øke kjørekomforten.



Figur 28 - Scanias eMachine. Kilde: Scania

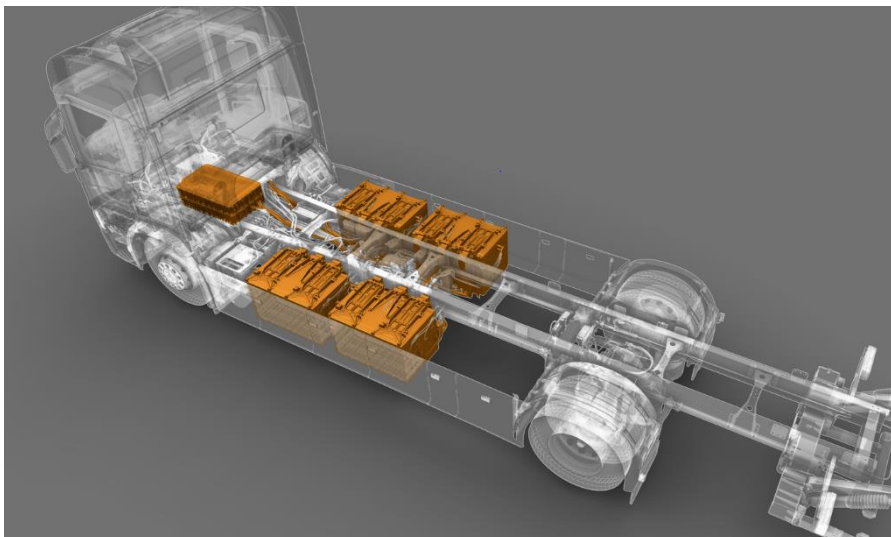
5.1.2 Oversikt over drivlinjen fra Scania

Den elektriske drivlinjen består batteripakkene og tilhørende styringssystem. På figur 29 er det de firkantete kassene som er koblet sammen med oransje ledninger. Selve motoren er plassert i midten, mellom batteripakkene. Koblet sammen med eMachine, er mellomaksel og bakaksel slik det ville vært å finne i en tradisjonell fossildrevet lastebil. Denne drivlinjekonfigurasjonen tilsvarer konfigurasjon 2 i kapittel 4.4.1.



Figur 29 – Oversikt over drivverket i Scania P25. Kilde: Scania

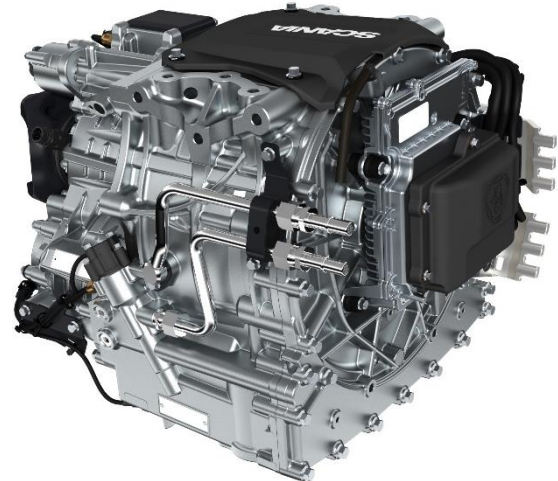
Den største andelen av det elektriske styringssystemet er plassert under hytta, der motoren i en tradisjonell lastebil ville vært plassert. Åtte av ni batteripakker er plassert under chassiset/lasteplanet. Den siste batteripakken er plassert sammen med styringssystemet under hytta.



Figur 30 - Batteripakkenes plassering Kilde: Scania

5.1.3 Elektrisk motor i lastebil fra Scania

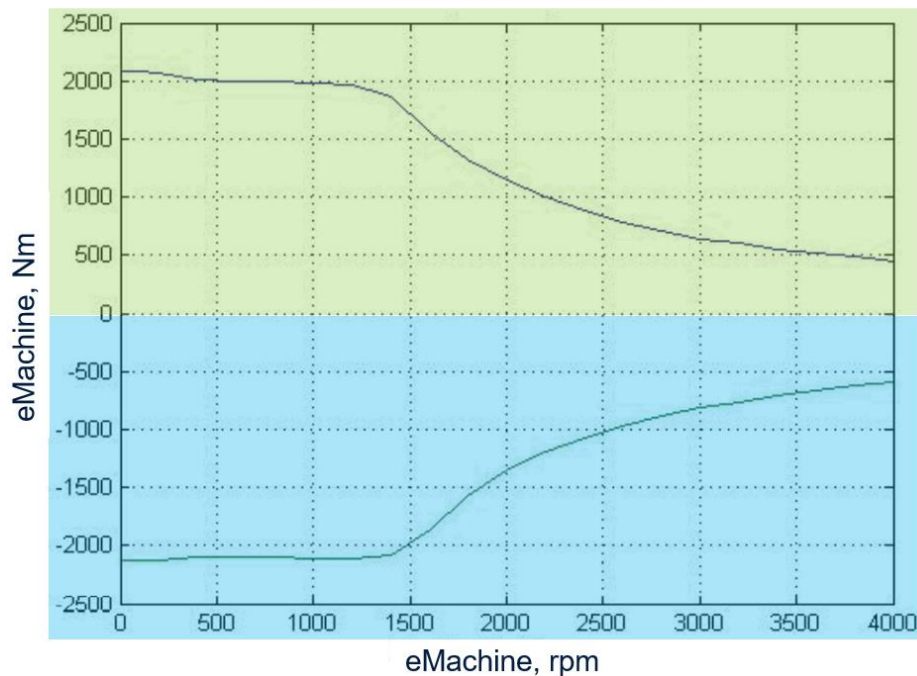
Den elektriske motoren i denne lastebilen er en permanent-magnet-motor med en maksimal effekt på 295 kW. Dette tilsvarer 395 hestekrefter. Motoren er koblet til batteripakkene via en inverter/omformer som gjør om strømmen fra likestrøm til vekselstrøm og styrer frekvensen. Anlegget i denne lastebilen har en nominell spenning på 650 volt.



Figur 31 - Scantias eMachine Kilde: Scania

Momentkurvene for eMachine blir vist i figur 32.

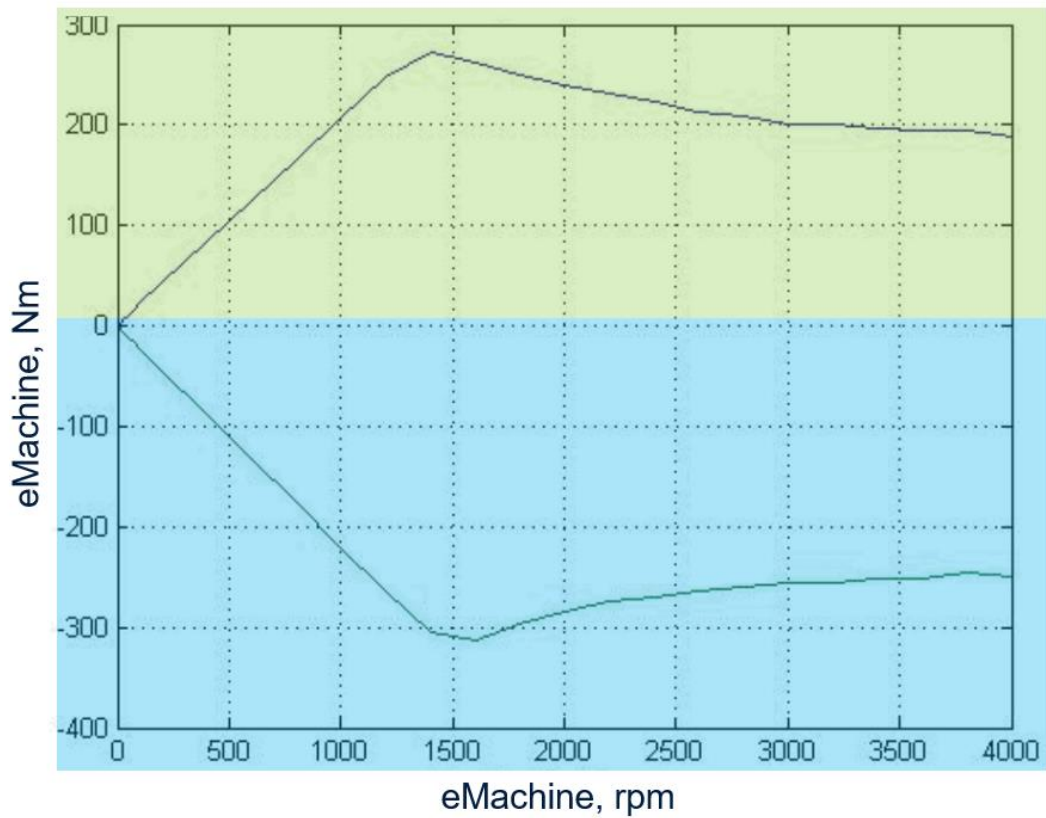
Dreiemomentkurve



Figur 32 - Momentkurve for eMachine. Kilde: Scania

Det grønne området representerer motoren i drift, og det blå området representerer motoren i regenerativ modus. I regenerativ modus kan lastebilen føre tilbake opp til 300 kW til batteripakkene. Ved regenerering kan motoren lade opp igjen batteriene med en kontinuerlig effekt på ca. 200 kW. Effektkurven blir vist i figur 33.

Effektkurve



Figur 33 - Effektkurve for eMachine Kilde: Scania

5.1.4 Girkasse i lastebil fra Scania

Girkassen er, som vist tidligere i figur 28, koblet direkte i samme hus som elmotoren. I denne versjonen har 1. gir en utveksling på 1:2,59 og 2. gir har direkte utveksling på 1:1. Girkassen har ingen revers, ved kjøring i revers blir retningen på strømmen snudd slik at motoren roterer motsatt vei. Girkassen fungerer på samme måte som en manuell girkasse, den er utstyrt med en pneumatisk sylinder som styrer skiftegeffelen. Sylinderen blir styrt av en elektrisk magnetventil. Ifølge Scania girer girkassen fra 1. til 2. gir ved rundt 40 km/t. Dette avhenger av last og andre forhold.

5.1.5 Bakaksling i lastebil fra Scania

Bakakslingen er samme aksling som blir brukt i tradisjonelle, fossildrevne Scania-lastebiler. I denne modellen har differensialen en utveksling på 5,29:1. For fossildrevne lastebilen blir differensialen levert med utvekslinger fra 2,87:1 til 4,30:1. [33] For fossildrevne lastebiler gjelder det å tilpasse utvekslingen i bakakselen til forventet cruise-fart for lastebilen.



Figur 34 - Bakaksling R756 i Scania P25 Kilde: Scania

5.1.6 Batteripakker og elektrisk styringssystem i lastebil fra Scania

Scania-modellen som blir studert i denne oppgaven leveres med alt fra 6 til 9 batteripakker. Hver batteripakke veier 257 kg og har en kapasitet på 32,6 kWh. Altså med ni pakker har den en total kapasitet på 293 kWh. Hver batteripakke inneholder 15 batterimoduler koblet i serie.



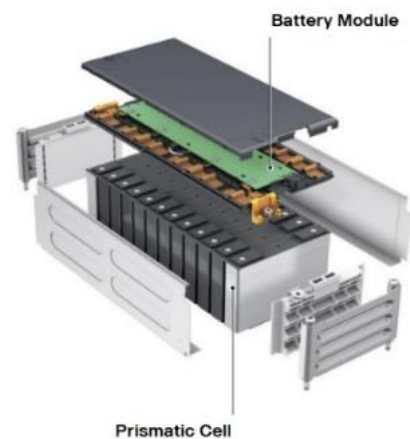
Figur 35 - Batteripakken i Scania P25

Hver batteripakke består av 180 litium-ion-celler montert i serie. En litium-celle har vanligvis en nominell spenning på ca. 3,7 V. [34] Når disse er montert i serie tilsvarer det en spenning på

$$V_{nom} = 3,7V * 180 = 666V$$

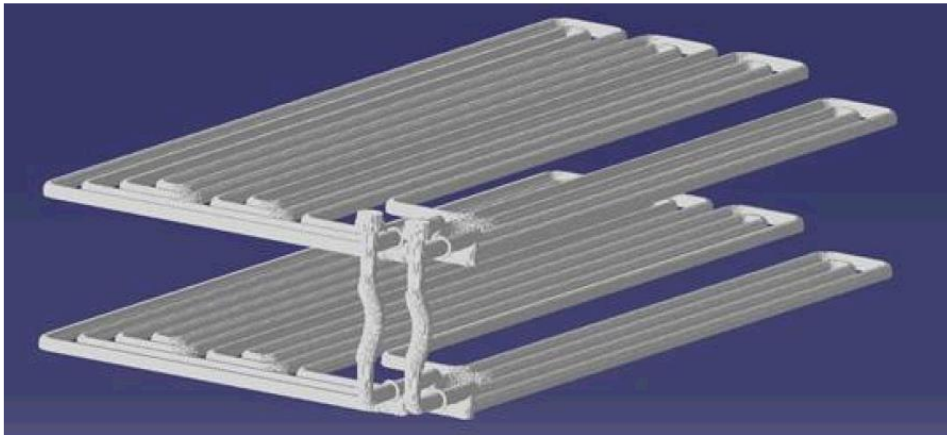
(43)

Scania spesifiserer at batteriet har en nominell spenning på 657 V. Spenningen varierer med SoC til batteripakkene. Spenningen kan variere mellom 540V og 756V, avhengig av SoC.



Figur 36 - Eksplodert visning av en batterimodul

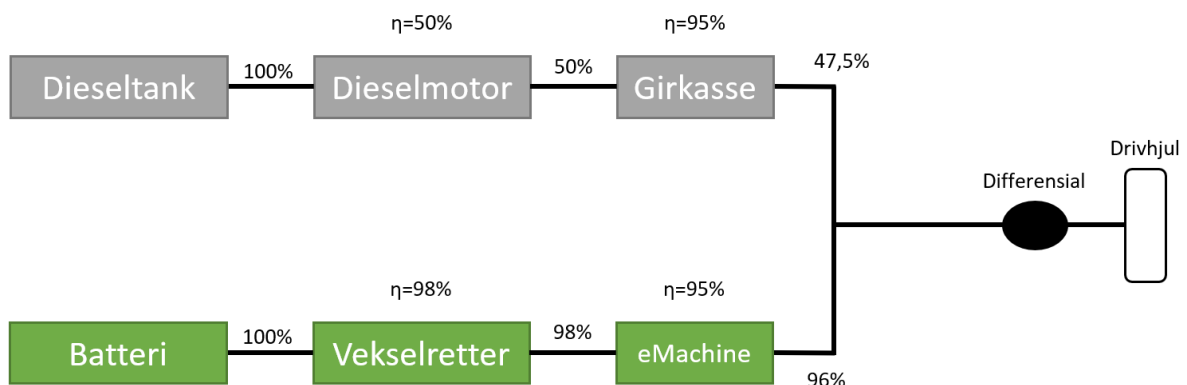
Batteripakkene er utstyrt med væskekjøling. Det er kjølekanaler (figur 37) inne i batteripakken. Batteriet skal optimalt holdes ved en driftstemperatur mellom 25 og 35 °C. Dette for å maksimere levetiden.



Figur 37 - Kjølekanalene i batteripakken

5.1.7 Tap i drivverk

Scania oppgir at mellom batteriet og girkassen har drivverket en virkningsgrad på ca. 96%. Videre i drivverket er det også et mekanisk tap. Ifølge Motorteknikk – Bilteknikk av Leif Lundby m.fl. [7] ligger den totale mekaniske virkningsgraden til et tungt kjøretøy med manuell giring på rundt 0,92. Noe lignende kan være rimelig å anta i dette kjøretøyet.



Figur 38 -Oversikt over tap i drivverket til fossildrevet lastebil og elektrisk lastebil Kilde: Scania

Den elektriske maskinen er svært effektiv og omgjør opp til 95% av den elektriske energien til mekanisk energi. I figur 38 er det en sammenligning av energieffektiviteten mellom dieselmotor og elektriske eMachine. Ulempen med elektrisk fremdrift i denne sammenhengen, er at overskuddsvarme ikke kan benyttes til oppvarming av kupéen på samme måte som i en fossildrevet lastebil. Derfor går store deler av energien til oppvarming av kupé.

5.2 Studie av Volvo FL Electric

Volvo har også satset på elektriske lastebiler, de presenterte i 2019 Volvo FE og FL Electric. I forbindelse med denne oppgaven er det skaffet tilgang til en momentkurve som tilhører FL Electric. Det er derfor denne modellen som blir fokusert i denne oppgaven.

5.2.1 Generell beskrivelse av FL-Electric

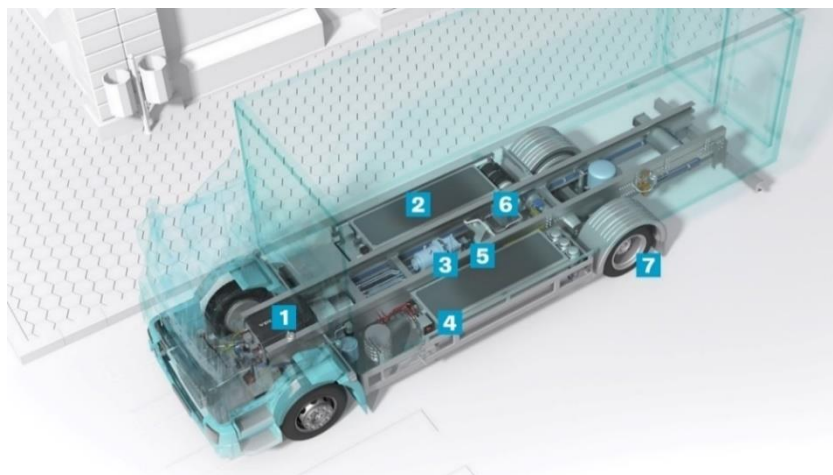
Denne lastebilen er mindre en Scania-modellen, se figur 39. Den har to aksler (4x2) og en totalvekt på opptil 16,7 tonn. Volvo-modellen har på samme måte som Scania-modellen én elektrisk motor og en 2-trinns girkasse. [35] Motoren har en maks effekt på 185 kW (maks), kontinuerlig yter den 130 kW. [36]



Figur 39 - Volvo FL Electric, brukt med tillatelse fra Volvo. Kilde: Volvo

5.2.2 Oversikt over drivlinjen i Volvo FL Electric

Drivlinjen består av en elektrisk motor, koblet direkte til en to-trinns girkasse. Under hytten (punkt 1 på figur 40) sitter en modulær strømforsyning. Denne styrer hele kjøretøyets elektronikk. Her styres både 24V-anlegget og 600V-anlegget fra. 24 V-anlegget benyttes til å styre elektronikken i førerhuset og annen elektronikk som ellers hadde vært å finne på en tradisjonell fossildrevet lastebil. Videre i



Figur 40 - Oversikt over drivlinjen i Volvo FL Electric - Av: Dan Hombø [37]

drivlinjen sitter batteripakkene (punkt 2 på figur 40). Midt under kjøretøyet, mellom batteripakkene, sitter den elektriske motoren og den tilhørende girkassen.

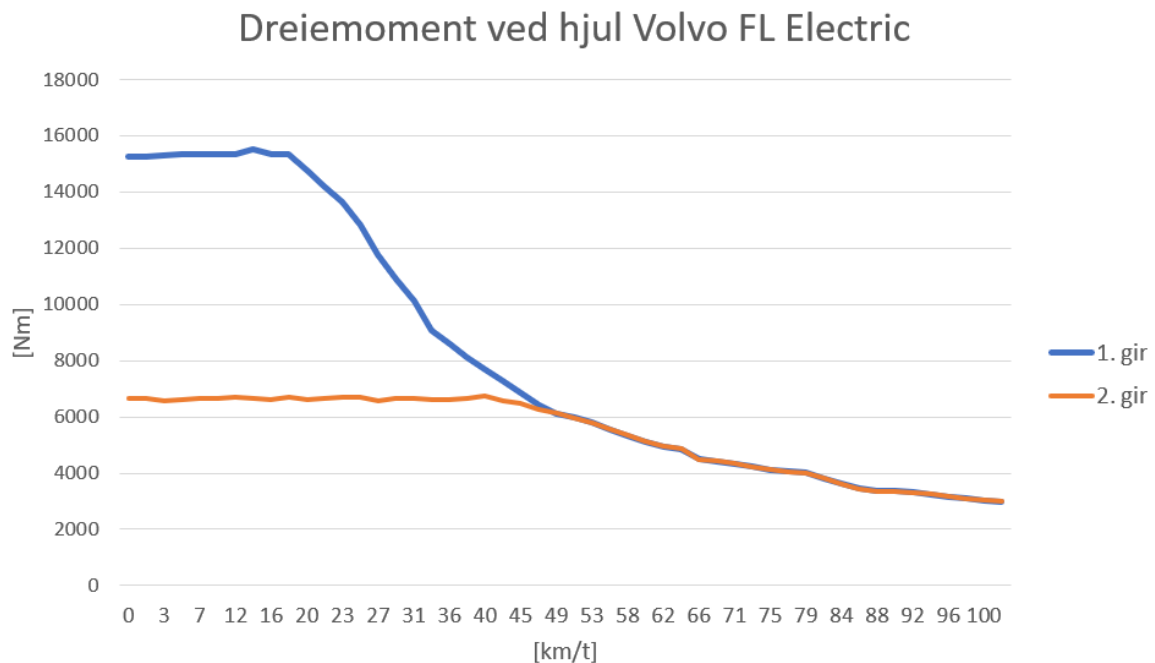
5.2.3 Motoren i Volvo FL Electric

Den elektriske motoren i Volvo-modellen er en EPT402 som leverer et maksimalt dreiemoment på 425 Nm og en maksimal effekt på 200 kW. Motoren er en permanentmagnetmotor. Enheten veier 210 kg.



Figur 41 - Elektrisk motor og girkasse EPT402 Kilde: Volvo

Momentkurvene for lastebilen blir vist i figur 42.



Figur 42 - Dreiemoment ved drivhjulene for Volvo FL Electric

I beregningskapittelet (Kap. 6.2.2) vil det bli beregnet hvordan momentkurven til motoren ser ut basert på komponentene i drivverket og denne kjente grafen.

5.2.4 Batteripakke i Volvo FL Electric

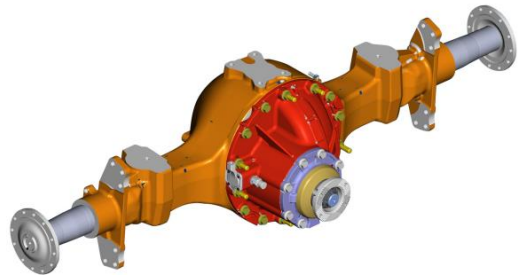
Batteripakkene i lastebilen består av litium-nikkel-mangan-kobolt-oksid-celler. Hver batteripakke har en kapasitet på 50 kWh og en levetid på opptil 10 år. Lastebilen kan konfigureres med 3 til 6 batterier. [37] Den totale kapasiteten varierer dermed fra 150 kWh til 300 kWh.



Figur 43 - Batteripakkene i Volvo FL Electric

5.2.5 Girkasse og bakaksel i Volvo FL Electric

Girkassen i drivlinjen har to gir med utveksling henholdsvis 7,99:1 og 3,52:1. Girkassen har større utvekslingsforhold enn girkassen i Scania-modellen fordi motoren yter svært mye lavere dreiemoment. Bakakslingen er en RSS1132A. Utvekslingsforholdet blir beregnet i kapittel 6.2.1.



Figur 44 - RSS1132A Bakaksel

5.3 Lastebil med dieselmotor

I dette kapitlet vil det bli gjort en kort presentasjon av en lastebil med dieselmotor. Lastebilen det blir satt søkelys på, er en Scania P250-modell som leveres med samme hytte som den elektriske Scania lastebilen, som er gjennomgått i denne rapporten.

5.3.1 Introduksjon Scania P250

Scania P250 er en lastebil med 4x2 drivverkskonfigurasjon. Drivhjulene blir drevet av en fem-sylindret dieselmotor som yter maks 250 hestekrefter (184 kW). Tillatt totalvekt er 19000 kg og uten last veier lastebilen ca. 6200 kg.

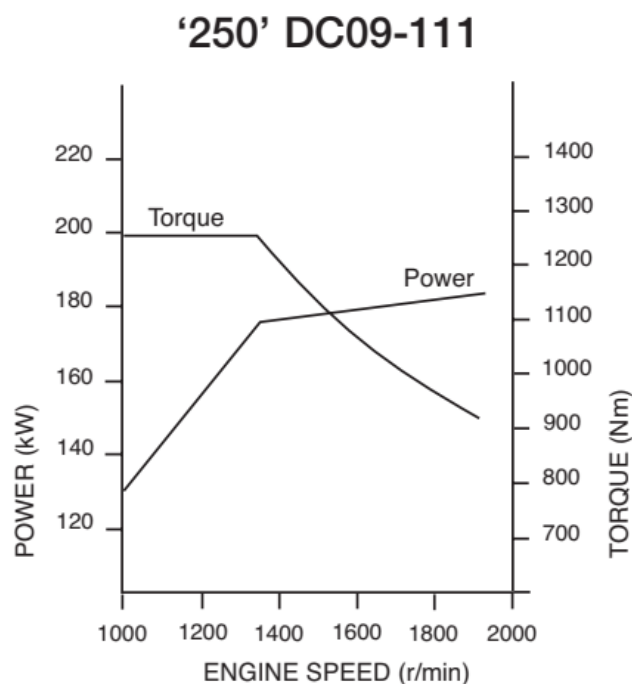


Figur 45 – Scania P250 Kilde: Lectura Specs [47]

5.3.2 Motor i Scania P250

Motoren er en DC-09-111 med cylindervolum på 9,3 L. Den leverer et maksimalt dreiemoment til drivakselen på 1250 Nm ved et turtall på mellom 1000 og 1350 rpm.

Motorens moment og effektkurve ser slik ut:



Figur 46 - Moment- og effektkurve for dieselmotor. Hentet fra databladet til Scania P-serien

5.3.3 Girkasse i Scania P250

Girkassen er av type syncromesh og har åtte gir. Den består av fire hovedgir og et planetgir med to utvekslinger. De åtte girenes utveksling blir vist i figur 47.

Utveksling i gir

Lave gir

1. 9,17:1

2. 6,26:1

3. 4,65:1

4. 3,75:1

Revers 11,00:1

Høye gir

5. 9,17:1

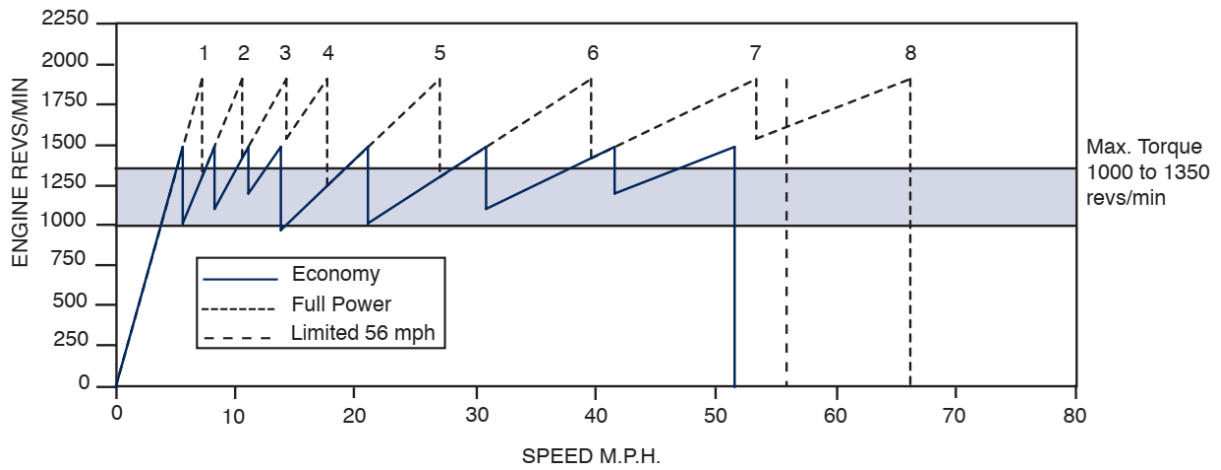
6. 6,26:1

7. 4,65:1

8. 3,75:1

Figur 47 - Utvekslingsforhold i girkassen. Hentet fra databladet til Scania P-serien

Figur 48 viser girskiftediagrammet. Det gir en oversikt over hvilke hastigheter de ulike girskiftene skjer ved.



Figur 48 – Girskiftediagram. Hentet fra databladet til Scania P-serien.

Differensialen er av type R560 og har et utvekslingsforhold på 3,42.

6. Beregninger

I dette kapittelet vil det bli utført beregninger på Scania P25, Volvo FL Electric og Scania P250. De ulike beregningene blir gjort på kjøretøyenes drivverk i forbindelse med de oppgitte momentkurvene.

6.1 Beregninger Scania P25

6.1.1 Beregning av luftmotstand

Informantene det har vært kontakt med i denne oppgaven visste dessverre ikke verdien på luftmotstandskoeffisienten for Scania P25. Derfor blir det gjort et forsøk på å estimere den. I kapittel 4.1.1 ble det presentert flere luftmotstandskoeffisienter for ulike typer lastebiler. Lastebilen fra Scania er en del nyere enn kilden som ble benyttet for disse luftmotstandskoeffisientene. Det blir derfor rimelig å anta at utviklingen har kommet noen steg lengre. Ifølge *Motorteknikk – Bilteknikk* [7] hadde en normalt bygd semi-trailer med sideskjørt og takspoiler en luftmotstandskoeffisient på ca. 0,46. Tesla Semi, som har et mye mer moderne og strømlinjeformet design, har en C_D på 0,36. Dermed antas det at testbilen i dette tilfellet, som er utstyrt med både takspoiler og sideskjørt, har en $C_D = 0,42$.



Figur 49 - Takspoiler og sideskjørt

I tillegg til C_D er det nødvendig å vite frontarealet til kjøretøyet. Her benyttet jeg en metode som er presentert i *Automotive Handbook* av Bosch [24]. Denne metoden går ut på å måle høyden og bredden på fronten av kjøretøyet, for deretter å multiplisere dette produktet med en reduksjonsfaktor 0,9 for å kompensere for tomme områder.

I følge scania.no har P-hytten i normal konfigurasjon en hyttestørrelse på 3040mm, inkludert hjulenes høyde blir dette ca. 3554mm. Her blir det lagt til halve hjulenes diameter som er 514mm. Lastebilens bredde er 2550 mm, det er gitt i vognkortet. Det totale arealet er ganget med faktoren 0,9 for å kompensere for området mellom hytten, bakken og forhjulene som er tomt.

$$A = 3554mm * 2550mm * 0,9 = 9,063m^2 * 0,9 = 8,16m^2$$

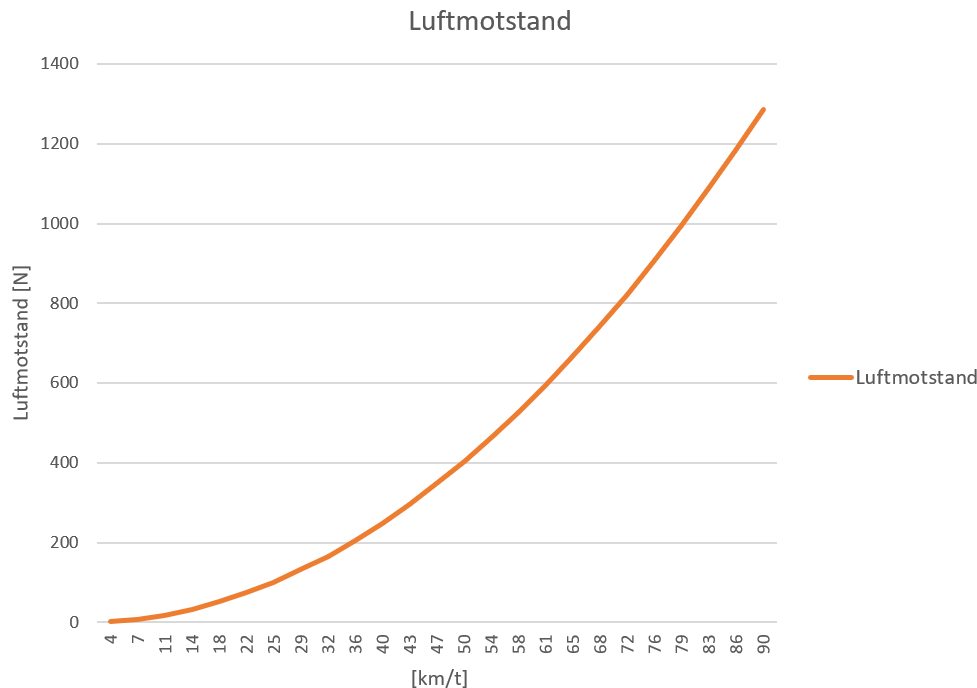
(44)

Luftmotstanden til dette kjøretøyet blir da gitt med formelen:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot C_w \cdot A \cdot \rho \cdot v^2 = \frac{1}{2} * 0,42 * 8,16m^2 * 1,25 \frac{g}{m^3} * v^2 = 2,14 * v^2$$

(45)

Figur 50 viser en graf som viser endring i luftmotstand fra 0 km/t til 90km/t. Ved 90 km/t er den totale luftmotstanden på ca. 1300N.



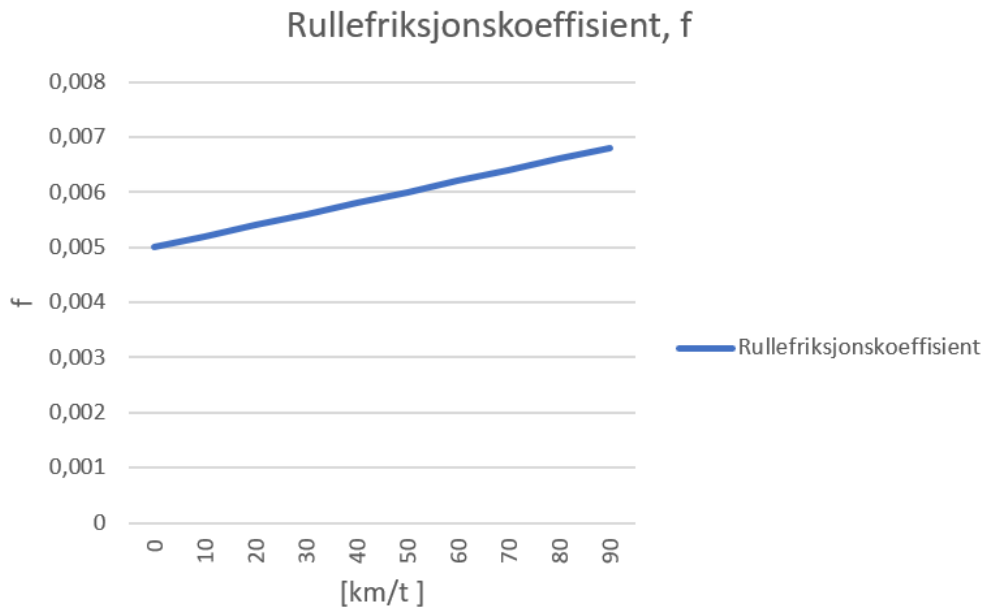
Figur 50 - Luftmotstanden for Scania P25 Elektrisk ved konstant fart

6.1.2 Beregning av rullemotstand

Rullemotstanden til dekkene er ikke en verdi som er offentlig publisert noe sted. Dekkene som benyttes på lastebilens drivhjul er Continental vinterdekk med dimensjon 295/80R22,5, rullemotstanden er gradert til E. Disse har en total rulleomkrets på 3228mm. Rullemotstanden er en størrelse som varierer avhengig av en rekke forhold.

For å utføre videre beregninger benyttes formel 4 som ble presentert i kapittel 4.1.2 for å estimere rullefriksjonsfaktoren til hjulene på tunge kjøretøy.

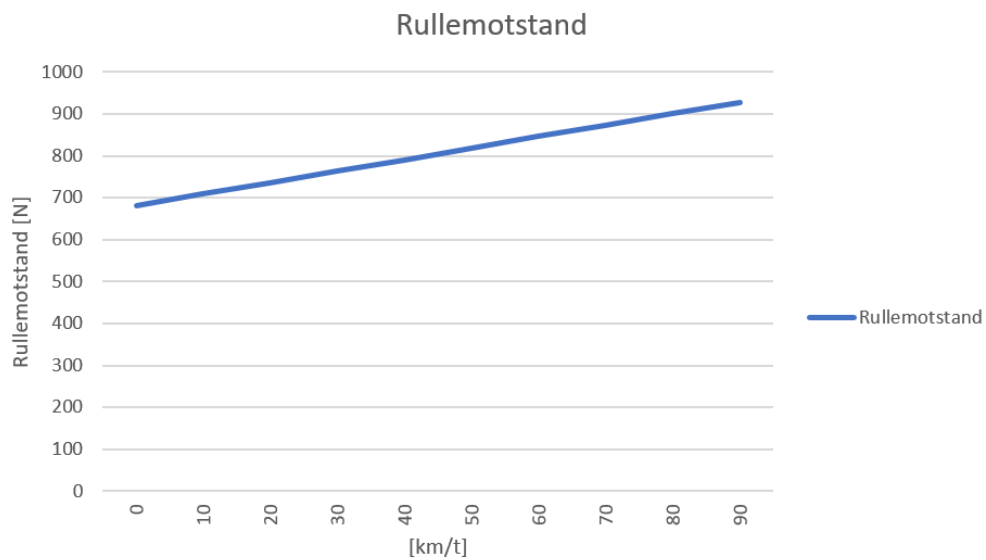
Figur 51 viser hvordan rullefriksjonsfaktoren kan variere fra 0 km/t til 90 km/t. Ved 90 km/t er den 0,0068.



Figur 51 - Rullefriksjonsfaktor

Videre benyttes formel 3 for å regne ut den totale rullemotstanden.

For lastebilen som blir studert i denne oppgaven ser endringen i rullemotstand ut som i figur 52, normalkraften regnet ut ved hjelp av lastebilens totalvekt (uten last, med fører) som er 13900kg. Ved 90 km/t er den totale rullemotstanden ca. 930N.



Figur 52 - Rullemotstand

6.1.3 Beregning av treghetsmoment for roterende komponenter

For å regne på hvor mye energi som er nødvendig for å sette kjøretøyet i bevegelse, eller for å øke eller senke farten, er det nødvendig å regne på massetregghetsmomentet til alle roterende komponenter i drivlinjen. Komponentene som vil påvirke akselerasjonsmotstanden er

- Hjul (dekk + felg)
- Tannhjul i differensial og girkasse
- Mellomaksling og stikkakslinger, med tilhørende universalledd og komponenter
- Rotoren i den elektriske motoren

Det har ikke lyktes meg med å anskaffe disse størrelsen fra produsent og det har også vært vanskelig å finne kilder som beskriver størrelsene. I dette kapittelet vil det bli gjort estimeringsberegninger på massetregghetsmoment for roterende komponenter i drivlinjen til en Scania P25 Elektrisk.

Estimering av massetregghetsmoment for dekk

Dekkene som står på lastebilen er radialdekk med størrelse 295/80R22,5. Dimensjonene presentert i figur 53 blir benyttet i videre beregninger. For å estimere massetregghetsmomentet er det blitt utarbeidet en CAD-modell, se figur 54. CAD-programmet regner selv ut volumet til dekket, slik at en tenkt tetthet for dekkmaterialet kan beregnes.

$$Tetthet = \frac{60820g}{52540000mm^3} = 0,00116 \frac{g}{mm^3} = 11,6 g/cm^3$$

Størrelse	295/80R22,5
Bredde (mm)	302
Diameter (mm)	1062
Radius m/ last (mm)	487
Rulleomkrets (mm)	3185
Mønsterdybde (mm)	19,1
Vekt (kg)	60,82

Figur 53 - Dimensjoner for dekkstørrelsen som blir benyttet på Scania P25. Hentet fra heuver.com [42]

(46)



Physical	
Mass	60787.699 g
Volume	5.254E+07 mm^3
Density	0.001 g / mm^3
Area	4.372E+06 mm^2
World X,Y,Z	0.00 mm, 0.00 mm, 0.0...
Center of Mass	0.00 mm, 0.00 mm, 0.0...
> Bounding Box	
v Moment of Ine...	
Ixx	1.294E+10
Ixy	3.448E-06
Ixz	6.896E-06
Iyx	3.448E-06
Iyz	7.197E-06
Izx	6.896E-06

Figur 54 – 3D-modell og parametere for modellen. Skjermdump fra Fusion 360.

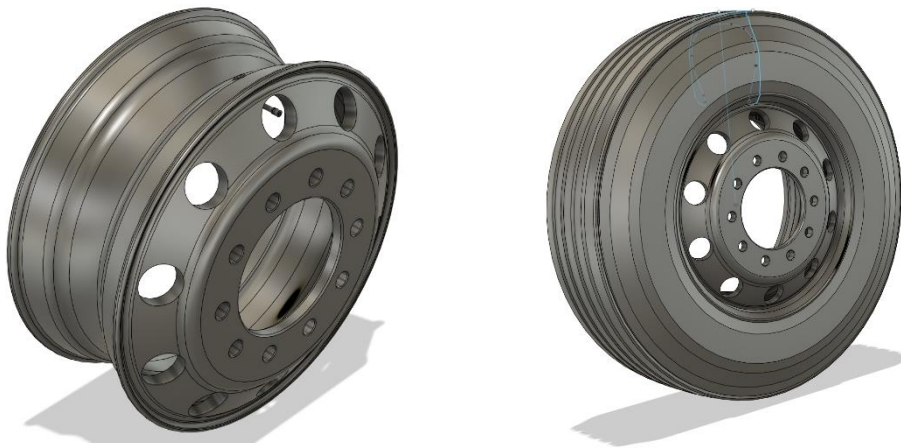
Deretter blir materialet til dekket oppdatert slik at den totale massen stemmer overens med virkeligheten. CAD-programmet regner da ut treghetsmomentet, se figur 54. Treghetsmomentet for dekket blir:

$$I_{dekk} = 12,94 \text{ kgm}^2 (= 1,294 \cdot 10^{10} \text{ gmm}^2)$$

(47)

Estimering av massetregghetsmoment for felg

Det blir benyttet samme metode som for dekket, til å estimere massetregghetsmomentet til felgen. Dekket som blir benyttet passer sammen med felg med dimensjon 22x8,25. I estimeringen blir CAD-modell hentet fra GrabCad [38] benyttet. Ifølge databladet til lignende ALCOA-felg, veier denne felgen ca. 23 kg.



Figur 55 - 3D-modell av felg + dekk. Skjermdump fra Fusion 360

$$I_{felg} = 1,32 \text{ kgm}^2 (= 1,32 \cdot 10^9 \text{ gmm}^2)$$

(48)

Det totale massetregghetsmomentet til dekket og felgen blir da

$$I_{hjul} = I_{dekk} + I_{felg} = 12,94 \text{ kgm}^2 + 1,322 \text{ kgm}^2 = 14,26 \text{ kgm}^2$$

(49)

Til slutt, for å ta med nav, bremseskiver, stikkakslinger og lignende i beregningene blir treghetsmomentet til hjulet forstørret med 20% for å kompensere for disse komponentene. Endelig treghetsmoment for alle komponentene etter differensialen blir da

$$I_{hjul} = 14,26 \text{ kgm}^2 \cdot 1,2 = 17,11 \text{ kgm}^2$$

(50)

Estimering av treghetsmoment for komponenter mellom motor og differensial

Mellom motoren og differensialen er det i hovedsak mellomakslingen og tannhjul i girkassen og differensialen som bidrar til den totale akselerasjonsmotstanden. Jeg velger dermed å regne med at størrelsen på treghetsmomentet mellom motor og differensialen blir estimert som et 5 meter langt stålrør som har en ytre diameter på 100mm og en indre diameter på 80mm.

Massen og treghetsmomentet for det hule røret er gitt med formlene:

$$m_{me} = \rho * V = 7900 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0,1^2 - 0,08^2) \cdot 5 = 111,7 \text{ kg} \quad (51)$$

Massetreghetsmomentet til et hult rør er gitt med formel 52.

$$I_{me} = \frac{m_{me}}{2} \cdot (r_y^2 - r_i^2) = \frac{111,7}{2} \cdot (0,05^2 - 0,04^2) = 0,23 \text{ kgm}^2 \quad (52)$$

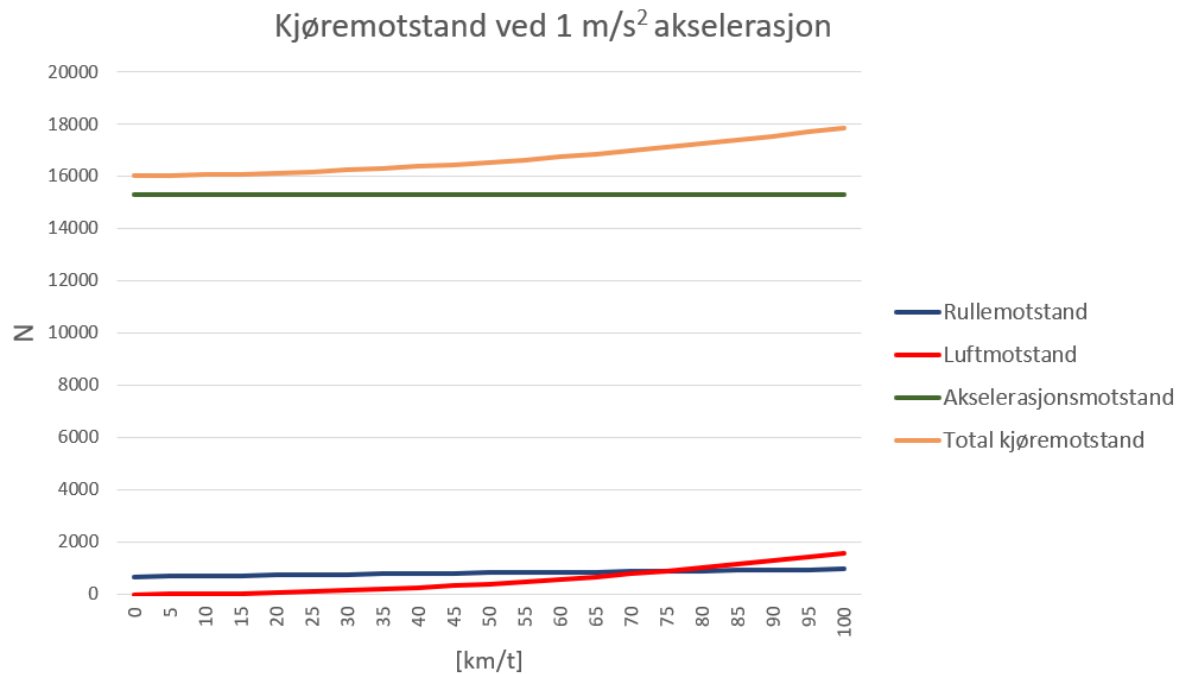
Ekvivalent translatorisk masse ved akselerasjon, blir da ved 14000 kg totalvekt:

$$m_{ekv} = 14000 + \frac{6 \cdot 17,1 + 0,23 \cdot 5,29^2 + 1,09 \cdot 13,7^2}{0,487^2} = 15322 \text{ kg} \quad (53)$$

Akselerasjonsmotstanden for Scania P25 er da ved tenkt last gitt med formelen:

$$F_a = a \cdot m_{ekv} = 15322 \cdot a \quad (54)$$

Ved 1 m/s^2 akselerasjon vil akselerasjonsmotstanden være 15322 N . 1 m/s^2 konstant akselerasjon tilsvarer en 0-100 tid på 27 sekunder. Se figur 56 for hvordan kjøremotstanden varierer mellom 0 og 90 km/t. Legg merke til hvor dominerende akselerasjonsmotstanden blir. Formelen for den totale kjøremotstanden blir presentert i neste kapittel.



Figur 56 - Kjøremotstand inkludert akselerasjonsmotstand for Scania P25

6.1.4 Total kjøremotstand

Den totale kjøremotstanden ved konstant akselerasjon ($a=0$) og α vinkel på underlaget er gitt med formel 55. Beregningene er gjort ved å se vekk fra vindhastighet.

$$F_{hjul} = \frac{1}{2} \cdot C_w \cdot A \cdot \rho \cdot v^2 + f \cdot N + m \cdot g \cdot \sin(\alpha)$$

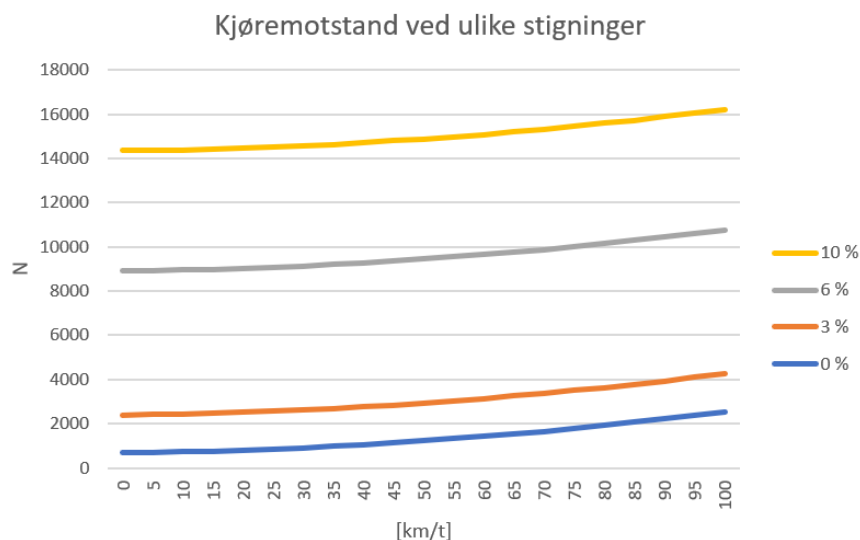
(55)

De ulike parameterne som har blitt benyttet i utregningene, er presentert i tabell 7. Parameterne er blitt gjort rede for i tidligere kapitler.

Tabell 7: Kjøretøysparametere benyttet i utregninger for Scania P25 Elektrisk

C_D	0,42
A	8,16 m²
ρ	1,25 kg/m³
v	0-32 m/s
f	Formel 4
m	14000 kg
g	9,81 N/kg
N	m·g
α	0° - 5,7°

Figur 57 viser kjøremotstanden for Scania P25. Grafene er satt opp som en funksjon av hastighet og stigningsvinkel. Ved 10 % stigning er det nødvendig med en drivkraft på ca. 16000N for å holde 90 km/t.



Figur 57 - Kjøremotstand ved ulike stigninger

En drivkraft på 16000N tilsvarer et dreiemoment på

$$T_d = F_{hjul} \cdot R = 16000N \cdot 0,487m = 7792 Nm$$

(56)

For å akselerer kjøretøyet med så lite som 1 m/s^2 legges det til en akselerasjonsmotstand på 15322N. Ved 10 % stigning nærmest dobles den totale kjøremotstanden. Det vil si at for å akselerere fra 25 m/s til 26 m/s kreves det et dreiemoment på

$$T_d = F_{hjul} \cdot R = (16000N + 15300N) \cdot 0,487m = 15243 Nm$$

(57)

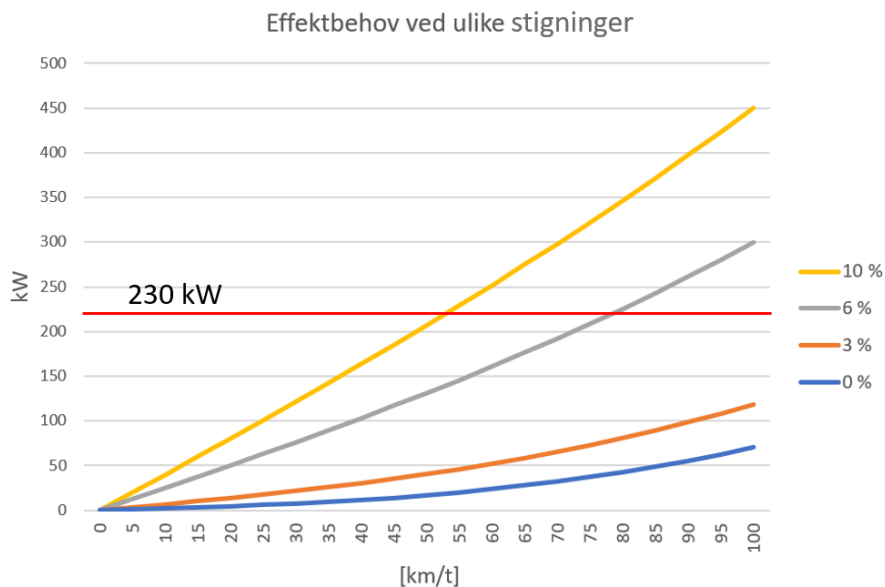
6.1.5 Effektbehov

Formelen for effekt ved drivhjulene er som vist tidligere:

$$P = F_{hjul} \cdot v$$

(58)

v er kjøretøyets hastighet (m/s) relativt til bakken. Komponenten fra luftmotstanden er proporsjonal med v^3 .



Figur 58 - Effektbehov ved ulike stigninger

Motoren yter en kontinuerlig effekt på 230 kW. Det vil si at lastebilen vil slite med å kjøre fortere enn 50 km/t i en oppoverbakke med 10% stigning.

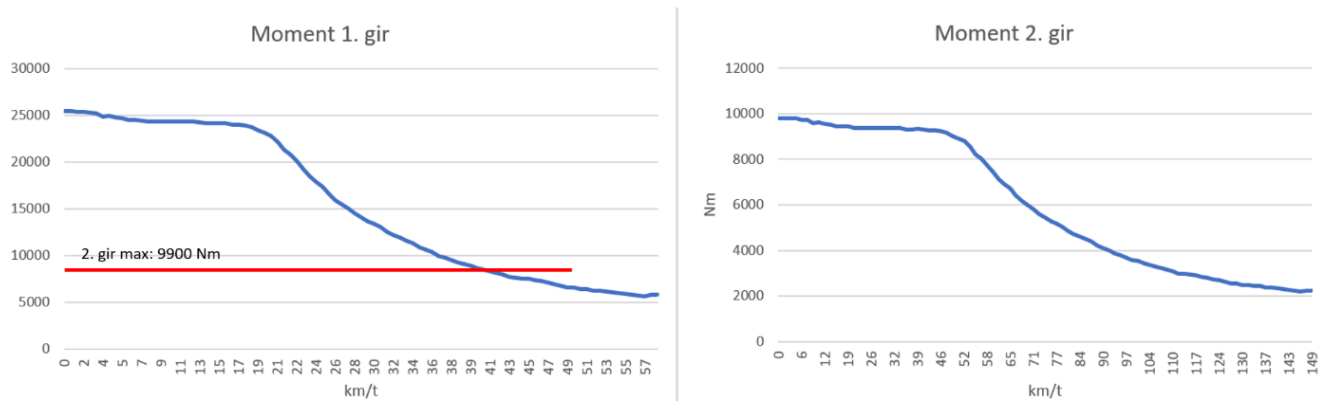
6.1.6 Maksimalt dreiemoment på drivhjulene ut fra momentkurvene

I dette delkapittelet blir det regnet ut hvor stort dreiemomentet ved drivhjulene på Scania-modellen er i 1. og 2. gir, i forhold til dreiemomentet til motoren. Formel 59 blir benyttet i utregningene.

$$T_{drivhjul} = T_{motor} \cdot i_g \cdot i_d \cdot \eta$$

(59)

I 2. gir er maksimalt dreiemoment rundt 9900 Nm. I 1. gir vil dreiemomentet være 9900 Nm når hastigheten til kjøretøyet er ca. 40 km/t. Da er det hensiktsmessig å gire til 2. gir. Kjøretøyets hastighet i 1. gir er begrenset til 57 km/t av rotorens maksimale turtall. I 2. gir er maksimal hastighet 150 km/t. Se figur 59 på neste side for grafer som viser momentet ved drivhjulene.



Figur 59 - Maksimalt moment ved drivhjulene i 1. og 2. gir

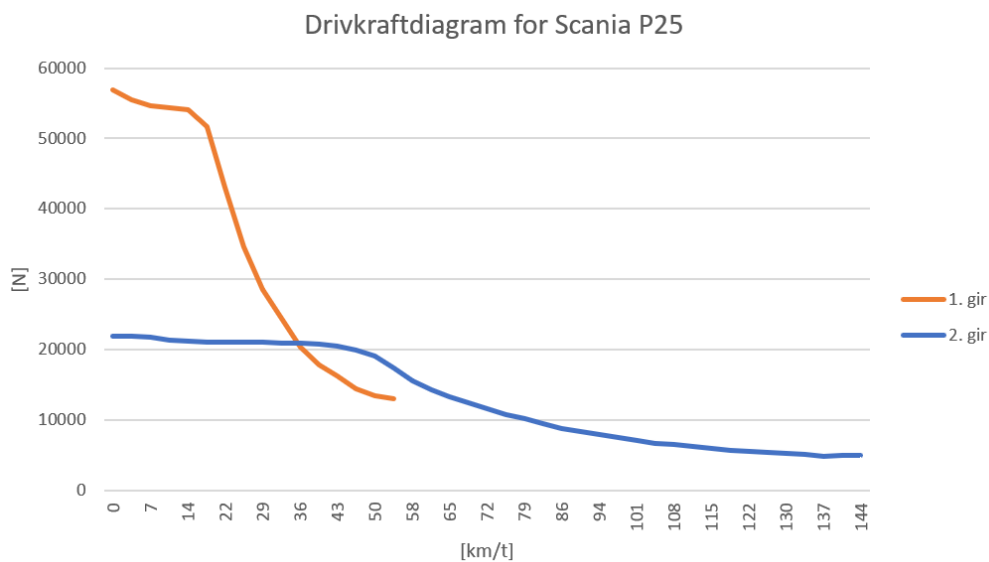
6.1.7 Drivkraftkurve

Drivkraftkurvene til Scania-modellen blir beregnet med følgende formler:

$$F_{hjul} = \frac{T_m \cdot i_g \cdot i_d \cdot \eta}{R} \tag{60}$$

$$v \left(\frac{km}{h} \right) = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot n_m}{60 \cdot i_g \cdot i_d} \cdot 3,6 \tag{61}$$

Den totale skyvekraften blir plottet på y-aksen og kjøretøyets hastighet blir plottet på x-aksen.



Figur 60 - Drivkraftdiagram for Scania P25

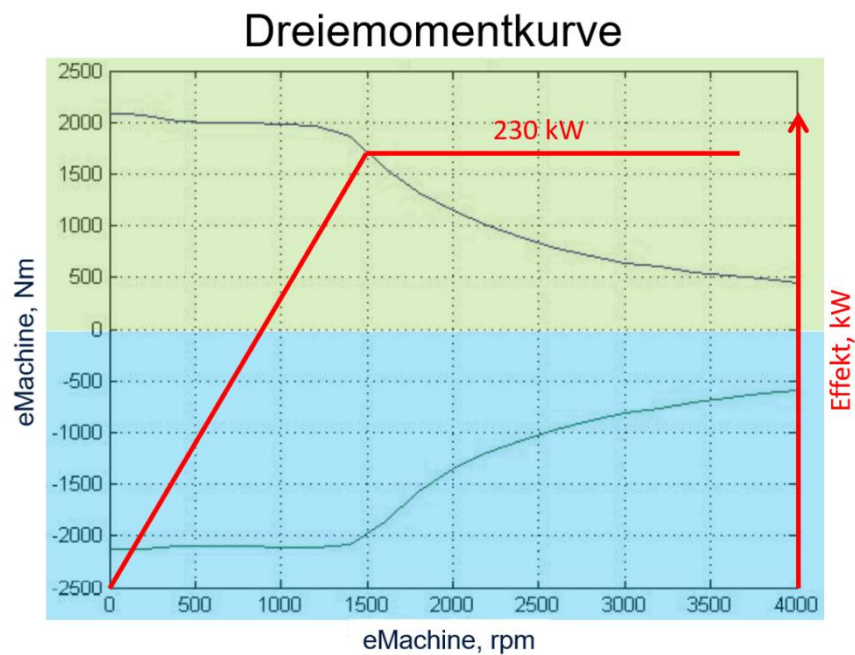
6.1.8 Beregning av akselerasjon fra 0 til 80 km/t for Scania P25

Momentdiagrammet til Scania P25 med bakhjulsdrift er vist i figur 61. I dette tenkte tilfellet har lastebilen følgende data presentert i tabell 8. Relasjonen mellom den deriverte av hastigheten og akselerasjonen blir benyttet for utregningene.

Tabell 8: Kjøretøysparametere benyttet i utregninger av akselerasjonen til Scania P25

m	14000 kg
R	0,487 m
f	Formel 4
C_D	0,42
ρ_{luft}	1,25 kg/m ³
$i_{1\text{-gir}}$	2,59
$i_{2\text{-gir}}$	1
i_{diff}	5,29
η	0,9
I_{motor}	1,09 kgm ²
I_{hjul}	17,1 kgm ²
I_{me}	0,23 kgm ²

Figur 61 viser motorens effektkurve. Det er oppgitt i motorens spesifikasjoner at den leverer en kontinuerlig effekt på 230 kW.



Figur 61 - Momentkurve med effektkurve som viser den konstante effekten

Akselerasjon fra 0-80 km/t (0-25 m/s).

Akselerasjonen deles inn i tre spenn:

Fra 0 til 5,6 m/s (område med maks dreiemoment):

Formel 17:

$$m_{ekv} = 14000 + \frac{6 \cdot 17,1 + 0,23 \cdot 5,29^2 + 1,09 \cdot 13,7^2}{0,487^2} = 15322 \text{ kg}$$

Formel 1:

$$F_{hjul} = F_L + F_R + F_A$$

$$F_A = \frac{T \cdot i_{tot} \cdot \eta}{R} - f \cdot m \cdot g - 0,5 \cdot C_D \cdot A \cdot \rho \cdot v^2$$

$$F_A = \frac{2000 \cdot 13,7 \cdot 0,9}{0,487} - (0,005 + 0,0002 \cdot 20) \cdot 14000 \cdot 9,81 - 0,5 \cdot 0,42 \cdot 8,16 \cdot 1,25 \cdot v^2$$

$$F_A = 15322a$$

$$50634 - 2,14v^2 = 15322a$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{50634 - 2,14v^2}{15300} \rightarrow dt = \frac{15322dv}{50634 - 2,14v^2}$$

Løser med integralkalkulator:

$$t = 15322 \int_0^{5,6} \frac{dv}{50634 - 2,14v^2} = \dots = 1,7s$$

Fra 5,6 m/s til 11 m/s (ved 11 m/s gires det fra 1. til 2. gir):

Formel 20:

$$P_{hjul} = F_{hjul} \cdot v \rightarrow F_{hjul} = \frac{P_{motor} \cdot \eta}{v} = \frac{0,9 \cdot 230000W}{v} = \frac{207000W}{v}$$

$$F_A = \frac{207000W}{v} - (0,005 + 0,0002 \cdot 40) \cdot 14000 \cdot 9,81 - 2,14v^2 = 15322a$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{207000 - 797v - 2,14v^3}{15322}$$

$$dt = \frac{15322 \cdot v \cdot dv}{248400 - 797v - 2,14v^3}$$

$$t = 15322 \int_{5,6}^{11} \frac{v \cdot dv}{207000 - 797v - 2,14v^3} = \dots = 3,46s$$

Fra 11 m/s til 22,2 m/s:

Nytt utvekslingsforhold pga. girskifte: $i_{tot} = 5,29 \cdot 1$, girskiftet tar ca. 1 sekund.

$$m_{ekv} = 14000 + \frac{6 \cdot 17,1 + 0,23 \cdot 5,29^2 + 1,09 \cdot 5,29^2}{0,487^2} = 14588 \text{ kg}$$

$$F_A = 14588a = \frac{207000W}{v} - (0,005 + 0,00002 \cdot 80) \cdot 14000 \cdot 9,81 - 2,14v^2$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{207000 - 934v - 2,14v^3}{14588v}$$

$$dt = \frac{14588v \cdot dv}{207000 - 934v - 2,14v^3}$$

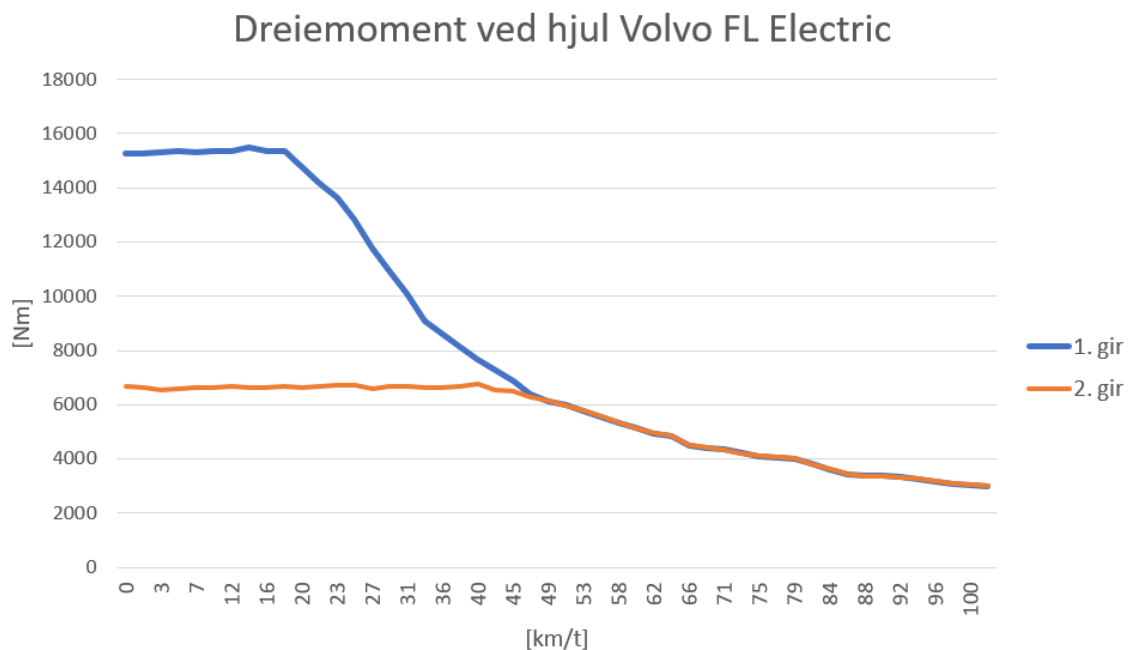
$$t = 14588 \int_{11}^{22,2} \frac{v \cdot dv}{207000 - 934v - 2,14v^3} = \dots = 15,24s$$

Total aksellerasjonstid fra 0-80km/t blir da $1,7s + 3,46s + 1s + 15,24s = \underline{21,4s}$

6.2 Beregninger Volvo FL Electric

6.2.1 Beregning av utvekslingsforhold i bakaksel

Det er kjent at utvekslingsforholdene i girkassen er 7,99:1 og 3,52:1. Ved hjelp av denne informasjonen, samt momentkurven til drivhjulene og maksimalt dreiemoment fra motoren, er det mulig å regne seg tilbake til utvekslingsforholdet i differensialen.



Figur 62 - Dreiemoment ved drivhjulene for Volvo FL Electric

Det er kjent at motoren i FL Electric yter maks 425 Nm.

$$T_{hj\ddot{u}l} = T_{motor} \cdot i_{gir_1} \cdot i_{diff} \cdot \eta$$

$$i_{diff} = \frac{15600Nm}{425Nm \cdot 7,99 \cdot 0,9} = 5,1$$

(62)

Ifølge databladet til bakakselen leveres differensialen med følgende utvekslinger. Den differensialen som passer best til utregningene er den med utveksling 5,14:1.

SPESIFIKASJONER	
Modellnummer	RSS1132AA
Type	Et hypoid-tannhjul
Vekt	520 kg
Kronhjul, diameter	415 mm
Drivaksel, diameter	53 mm
Maks. dreiemoment	1050 Nm
Maks aksellast	11,5 tonn
Maks totalvekt	32,5 tonn
Utvekslingsforhold	3,78:1 4,13:1 4,50:1 5,14:1 5,67:1 6,17:1

Figur 63 - Tabell fra databladet til bakaksling RSS1132A

Den totale utvekslingen i henholdsvis 1. og 2. gir blir da 41,1 og 18,1.

6.2.2 Beregning av momentkurven til ET402

Benytter formel 63 for å regne om fra kjøretøyets hastighet til rotorens turtall.

$$v \left(\frac{km}{h} \right) = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot n_m}{60 \cdot i_g \cdot i_d} \cdot 3,6$$

(63)

$$n_m = \frac{60 \cdot i_g \cdot i_d}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot 3,6} \cdot v \left(\frac{km}{t} \right)$$

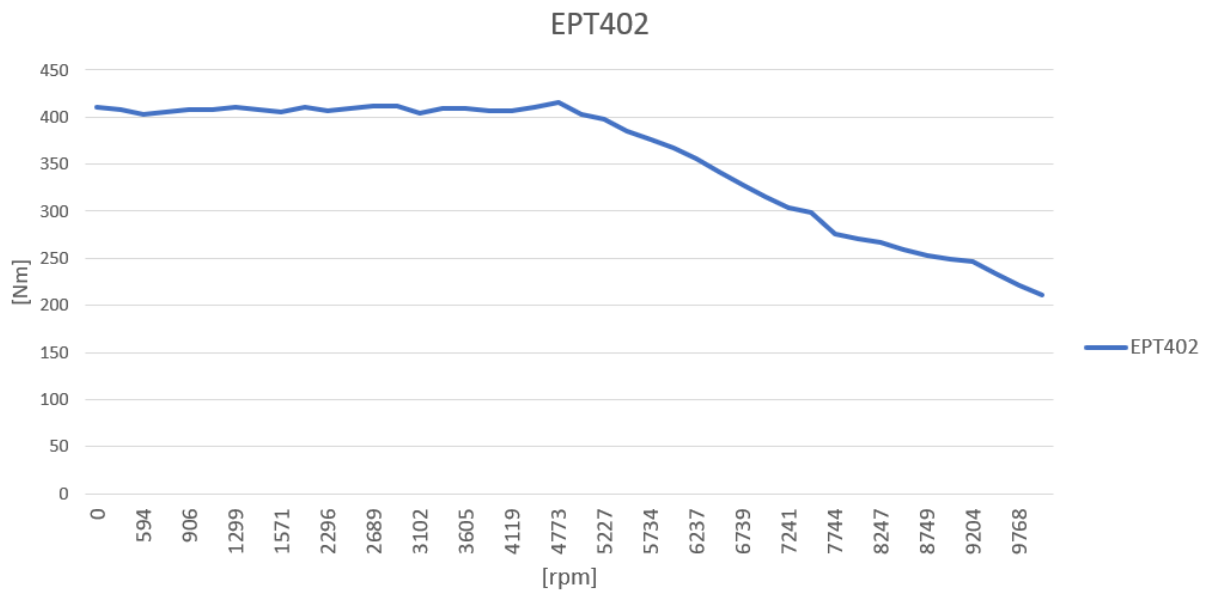
(64)

Formelen for dreiemomentet ved motoren ser slik ut:

$$T_m = \frac{T_{hj\ddot{u}l}}{i_g \cdot i_d \cdot \eta}$$

(65)

Ved å sette verdiene inn i formel 63-65 blir momentkurven seende ut som i figur 64.

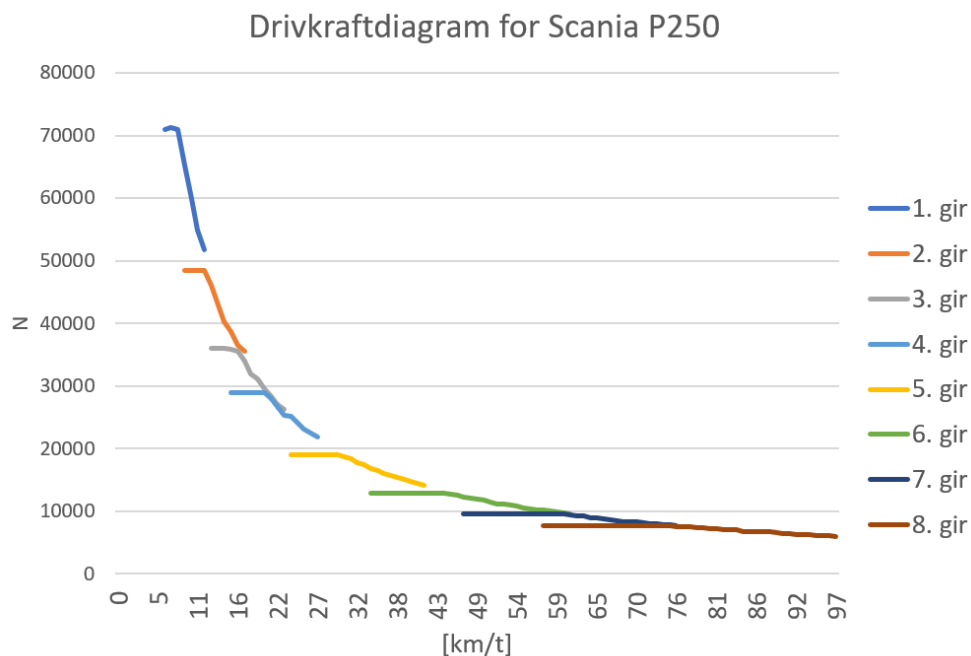


Figur 64 - Estimert momentkurve for EPT402 motor

6.3 Beregninger Scania P250 (diesel)

6.3.1 Drivkraftkurve

Drivkraftkurven blir fremstilt ved hjelp av data fra kapittel 5.3. Diameteren på drivhjulene blir satt til 0,51 m. Samme formler som i kapittel 6.1.7 blir benyttet. Drivkraftkurven ser da slik ut:



Figur 65 - Drivkraftkurve for Scania P250 Diesel – 8 gir

7. Resultater 2: Testing på landevei

7.1 Tester av Scania P25

7.1.1 Test 1: Akselerasjonstest

For å verifisere beregningene og antakelsene som er gjort tidligere i oppgaven, er det blitt utført to ulike tester av en Scania P25 elektrisk lastebil på landevei. I dette forsøket er det gjort en akselerasjonstest. Lastebilen ble kjørt på tilnærmet flat landevei, på tre ulike veistrekninger. Den startet fra 0 km/t og så ble det tatt tiden på akselerasjonen opp til 80 km/t. Resultatene er presentert i tabell 9. Lastebilen skiftet gir rundt 40 km/t. Dette tok i underkant av ett sekund. Under testen var totalvekten på lastebilen 13,9 tonn.

Tabell 9: Test av akselerasjon for Scania P25 Elektrisk

<i>Hastighet:</i>	<i>Tid 1 (s):</i>	<i>Tid 2 (s):</i>	<i>Tid 3 (s):</i>	<i>Gj. snitt (s):</i>
0-50 km/t	8,56	9,81	10,19	9,5
0-60 km/t	11,71	13,09	13,47	12,8
0-70 km/t	15,23	16,49	17,07	16,3
0-80 km/t	19,91	22,22	23,54	21,9

7.1.2 Test 2: Estimering av rullefriksjonskoeffisient og luftmotstandskoeffisient

Testprosedyren presentert i kapittel 4.1.3 blir benyttet. Testdata er oppsummert i tabell 10.

Tabell 10: Estimering av f og C_D , testresultater

<i>Hastighetsspenn:</i>	<i>Tid (s):</i>
60-55 km/t	11,5
40-35 km/t	14,3

Formel 6-11 benyttes for beregninger:

$$a_a = \frac{v_{a1} - v_{a2}}{t_a} = \frac{\left(\frac{60}{3,6} - \frac{55}{3,6}\right)}{11,04} = 0,126 \frac{m}{s^2}$$

(66)

$$a_b = \frac{v_{b1} - v_{b2}}{t_b} = \frac{\left(\frac{40}{3,6} - \frac{35}{3,6}\right)}{14,43} = 0,096 \frac{m}{s^2}$$

(67)

$$v_a = \frac{v_{a1} + v_{a2}}{2} = \frac{\frac{60}{3,6} + \frac{55}{3,6}}{2} = 15,97 \frac{m}{s}$$

(68)

$$v_b = \frac{v_{b1} + v_{b2}}{2} = \frac{\frac{40}{3,6} + \frac{35}{3,6}}{2} = 10,42 \frac{m}{s}$$

(69)

Estimert luftmotstandskoeffisient, C_D :

$$C_D = \frac{m \cdot (a_a - a_b)}{\frac{\rho_L \cdot A(v_a^2 + v_b^2)}{2}} = \frac{13900kg \cdot (0,126 - 0,096) \frac{m}{s^2}}{\frac{1,25 \frac{kg}{m^3} \cdot 8,16m^2 \cdot (15,97^2 - 10,42^2)}{2}} = 0,44$$

(70)

Estimert rullefriksjonskoeffisient, f :

$$f = \frac{a_b \cdot v_b^2 - a_a \cdot v_a^2}{g(v_b^2 - v_a^2)} = \frac{(0,096 \cdot 10,42^2 - 0,126 \cdot 15,97^2)}{9,81(10,42^2 - 15,97^2)} = 0,014$$

(71)

8 Diskusjon

8.1 Sammenlikning av presenterte lastebiler

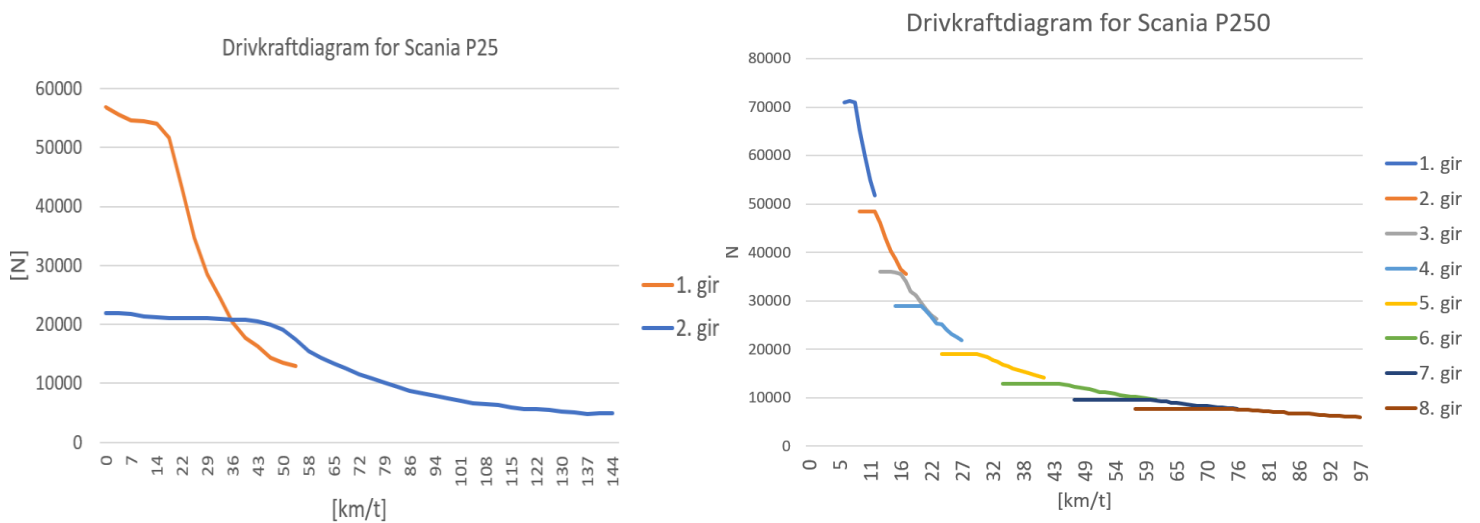
Tabell 11: Sammenlikning av elektriske lastebiler

	Scania P25 Elektrisk	Volvo FL Electric
Tillatt totalvekt	28000 kg	18000 kg
Type elektrisk motor	PMSM*	PMSM*
Drivverkskonfigurasjon	6x2	4x2
Maksimalt dreiemoment ved motor	2200 Nm	450 Nm
Maksimalt dreiemoment ved hjul	25000 Nm	16000 Nm
Utveksling differensial	5,29	5,16
Utveksling 1.gir/2. gir	2,59/1	7,99/3,52
Maksimalt turtall motor	4000 rpm	10000 rpm

*Permanent Magnet Synchronous Motor

Det er stor forskjell på motorene som blir benyttet i de to kjøretøyene. Noe av forskjellen kan forklares på grunn av totalvekten til kjøretøyet, Volvo FL behøver mindre dreiemoment fordi den er lettere. Motoren til Scania-modellen leverer nærmest 5 ganger så høyt dreiemoment. Begge motorene har rotor konstruert av permanentmagneter. Det har blitt redegjort for hvordan forholdet mellom rotordiameter og bredde påvirker maksimalt dreiemoment og turtall. Det kommer tydelig frem i disse to motorene. Scanias eMachine har stor diameter og kort lengde, i motsetning til Volvos EPT402 som er lang og smal. Når Volvo benytter en motor med relativt lavt dreiemoment, blir det nødvendig med høy girring. I 1. gir har lastebilene fra Scania og Volvo henholdsvis et totalt utvekslingsforhold på 13,7 og 41,2. Den store forskjellen kommer av behovet for høyt dreiemoment i lavt gir. Motoren i Scania P25 produserer tilstrekkelig dreiemoment uten høy utveksling.

8.2 Elektrisk motor sammenlignet med dieselmotor



Figur 66 - Drivkraftdiagram for elektriske Scania P25 (til venstre) og Scania P250 (til høyre)

Figur 66 viser drivkraftdiagrammet for en lastebil med dieselmotor og for en lastebil med elektrisk drivlinje. Her kommer fordelene med momentkarakteristikken på elektriske motorer tydelig frem. Lastebilene får cirka samme skyvekraft ved alle hastigheter, selv om den elektriske lastebilen kun har to gir. For å få samme ytelse og form på drivkraftkurven med en dieseldrevet lastebil, er det nødvendig med åtte gir.

8.3 Teoretiske beregninger sammenliknet med praktisk testing

Beregnet aksellerasjonstid for Scania P25 Elektrisk fra 0-80 km/t var 21,4s. Dette ble beregnet ved hjelp av en estimert luftmotstandskoeffisient og en rekke antagelser. Ved praktisk testing ble gjennomsnittsverdien av tre forsøk 21,9s. Dette bekrefter at estimeringene som er foretatt, er fornuftige. Det vil si at antatt luftmotstandskoeffisient og beregning av massetregningsmoment i forbindelse med akselerasjonsmotstand er i nærheten av reelle verdier.

Ved hjelp av estimeringsprosedyren presentert i kapittel 4.1.3 ble det gjort et forsøk for å estimere luftmotstandskoeffisient, C_D og rullestandskoeffisient, f . De utregnede verdiene fra forsøket ble henholdsvis 0,44 og 0,014. Dette er en C_D som er svært lik antatte 0,42. Det er dermed sannsynlig at C_D til Scania P25 er i område 0,4-0,45. Estimert rullestand ble høyere enn det som er benyttet i beregningene og det de faktiske dekkene er gradert til å ha. Dette kan skyldes slitte dekk, feil lufttrykk eller ujevnt underlag. Det burde blitt utført flere målinger i denne testen for å luke ut feilkilder. Forhold som ble neglisjert under testingen var vind og stigning.

8.4 Hvorfor PMSM

Permanentmagnetsynkronmotor kan levere høyt dreiemoment ved lavere turtall. Motoren kan også omgjøre den elektriske energien til mekanisk energi med svært høy virkningsgrad. Ulempen med PMSM er at materialet i rotoren er dyrt å anskaffe, slik at motorene koster mer enn for eksempel en induksjonsmotor. PMSM kan også bli rammet av avmagnetisering hvis rotoren blir skadet eller overopphetet.

8.5 Resultat av litteraturstudiet

Det er to kilder som stikker seg ut som svært nyttige på det området rapporten angår. Den første kilden er rapporten *Influence of Powertrain Topology and Electric Machine Design on Efficiency of Battery Electric Trucks – A Simulative Case-Study* [1] som er utarbeidet ved det tekniske universitetet i München. Denne artikkelen tar for seg ulike drivverkskonfigurasjoner som er relevante i elektriske lastebiler. I tillegg ble det utført simuleringer av drivverkskonfigurasjonene med ulike typer elektriske motorer. Denne artikkelen har vært til stor hjelp med å kartlegge ulike drivverkskonfigurasjoner og hvordan ulike motorer oppfører seg i elektriske lastebiler. I tillegg presenterer artikkelen flere eksisterende løsninger som allerede er på det europeiske markedet. Resultatene fra artikkelen viste dreiemomentkurver og effektkarakteristikken til de ulike drivverksoppsettene.

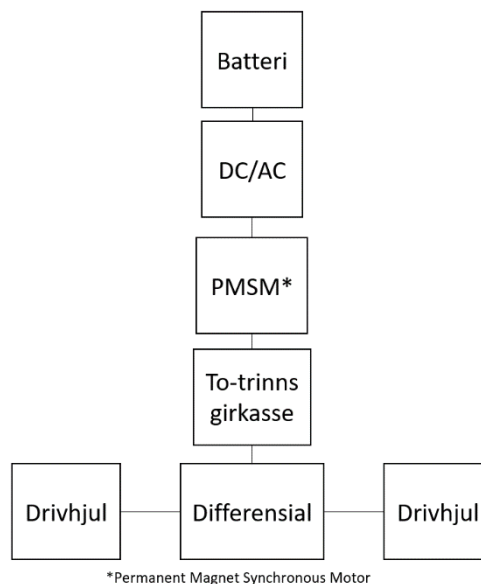
Den andre kilden er boken *Heavy duty electric vehicles – from concept to reality* [2]. Den tar for seg ulike designvalg, produksjonsmetoder og fremtidsutsiktene til elektriske lastebiler og busser. I tillegg presenterer boken en steg-for-steg-liste om hvordan designe og planlegge utviklingen av tunge elektriske kjøretøy. Den har vært veldig nyttig i prosessen med å kartlegge ulike batterityper, motortyper og kjøretøysteori.

8.6 Anbefalinger for videre arbeid

- Gjøre flere tester på vei for å verifisere beregninger.
- Samle inn informasjon om lastebiler med andre drivverksløsninger, pr. i dag er det ikke utbredt blant vestlige produsenter.
- Utarbeide simuleringer av kjøretøy under ekte forhold for å beregne strømforbruk og rekkevidde.
- Opprette kontakt med ingeniøravdelingen hos fabrikantene for å få mer detaljert teknisk informasjon fra ingeniørsiden.

9 Konklusjon

I løpet av denne rapporten har det blitt presentert informasjon hentet inn fra Scania, Volvo og litteratursøk. Det er innhentet informasjon om to elektriske lastebiler og en dieseldrevet lastebil. Drivverkets oppbygning har blitt fremstilt detaljert for alle tilfellene. I diskusjonskapittelet ble lastebilene sammenlignet. Av de studerte lastebilene er drivverksoppsettet relativt likt, selv om de har sine ulikheter. Felles for begge er at de har en sentral motor som ved hjelp av en drivaksel og differensial fordeler drivkraften på to drivhjul. Drivverksoppsettet på de studerte elektriske lastebilene blir vist i figur 67. Dette drivverksoppsettet er svært likt som det som er å finne i tradisjonelle dieseldrevne lastebiler. I løpet av oppgaven har ulike drivverksoppsett blitt gjennomgått. Det er flere designmuligheter med elektriske lastebiler fordi motorene har annerledes momentkarakteristikk og turtallsområde.



Figur 67 - Drivverksoppsett i studerte lastebiler * Permanentmagnetsynkronmotor

Uttekslingen i girkassen og bakakselen er avhengig av motorens momentkarakteristikk og lastebilens drivkraftbehov. Hvis motoren kan levere høyt dreiemoment ved lavt turtall, kan utvekslingen være lav. PMSM er god til å levere høyt dreiemoment ved lavere turtall. Dette er dermed en god motor for tungtrafikk som ikke behøver høy topphastighet, men høyt dreiemoment ved lavere fart. Det var ønskelig å gjøre rede for størrelsen på ulike drivverksparametere slik at det var mulig å gjøre beregninger på drivverket til elektriske lastebiler. I tabell 12 er typiske størrelser på drivverksparametere i elektriske lastebiler oppsummert. Merk at dette er ment som en oppsummering av funnene i denne rapporten for å opplyse om hvilket størrelsesområde de ulike parameterne befinner seg i. Parameterne er estimert og beregnet ved hjelp av formelverk og CAD-programvare. I tillegg er det utført testing for å verifisere beregningene. Det ble gjort beregninger for å estimere aksellerasjonstiden fra 0 til 80 km/t for Scania P25 Elektrisk med parametere innhentet fra

ressurspersoner og estimerte parametere. Beregningene viste 21,4s. Testingen som ble utført på landevei resulterte i en gjennomsnittstid på 21,9s. Dette var gode resultater som verifiserte at beregningene var fornuftige.

Tabell 12: Oppsummering av drivverksparametere for elektriske lastebiler funnet og estimert i denne rapporten

C_D	0,40-0,50
f	0,005-0,007
$i_{\text{differensial}}^*$	$\approx 5,2$
$i_{\text{gir}} (1. \text{ gir}/2. \text{ gir})^*$	$\approx 2,6:1/1:1$ eller $\approx 8:1/3,6:1$
$I_{\text{hjul}} (\text{inkl. nav og akslinger})$	$\approx 14 \text{ kgm}^2 (\approx 17 \text{ kgm}^2)$
I_{me}	$\approx 0,2 \text{ kgm}^2$
I_M	$\approx 1,1 \text{ kgm}^2$
m	9000 kg-30000 kg
A	$8 \text{ m}^2 - 10 \text{ m}^2$
R	$\approx 0,5\text{m}$

*Avhengig av motorens momentkarakteristikk og lastebilenes drivkraftbehov

Av videre arbeid på området anbefales det å lage simuleringer av kjøretøyene for å simulere forbruk og ytelse ved ulike kjøremønstre. I tillegg hadde det vært interessant å samle inn informasjon om kjøretøy som benytter andre drivverksoppsett enn det som er presentert i denne rapporten. Det blir spennende å følge med på utviklingen på batterifronten i årene fremover. Der er det store rom for utvikling som kan gjøre den elektriske lastebilen mer aktuell for langtransport.

Referanser

1. Wolff S, Kalt S, Bstieler. [Influence of Powertrain Topology and Electric Machine Design].; 2020 [hentet 2022. 23. 04. Link: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/2/328/htm>.
2. Arora S, Abkenar AT, Jayasinghe SG, Tammi K. Heavy-duty Electric Vehicles. 1st utg. Deans M, editor.: Butterworth-Heinemann; 2021.
3. Miljødirektoratet. Norske utslipp og opptak av klimagasser. [Online].; 2021 [hentet 2022. 14. 10. Link: <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/tema/klima/norske-utslipp-av-klimagasser/>.
4. Melding til Stortinget. Nasjonal transportplan 2022-2033. [Online].; 2021 [hentet 2022. 05. 02. Link: <https://www.regjeringen.no/contentassets/fab417af0b8e4b5694591450f7dc6969/no/pdfs/stm202020210020000dddpdfs.pdf>.
5. Department of Energy. Timeline: History of the Electric car. [Online]. [hentet 2022. 05. 04. Link: <https://www.energy.gov/timeline/timeline-history-electric-car>.
6. JCRIST MUSEUM. 1919 Walker LA-10 Electric. [Online]. [hentet 2022. 05. 04. Link: <https://jcrismuseum.org/museum/1919-walker-la-10-electric/>.
7. Lundby L, Moen JE, Myklebostad I. Motorteknikk - Bilteknikk. 1st utg. Oslo: Gyldendal Undervisning; 2002.
8. Paul R. [MOTORTREND].; 1996 [hentet 2022. 01. 27. Link: <https://arstechnica.com/cars/2019/03/the-tesla-model-3-reviewed-finally/>.
9. Airshaper. [AIRSHAPER].; 2022 [hentet 2022. 01. 27. Link: <https://airshaper.com/cases/tesla-semi-truck-aerodynamics-analyzed>.
10. Gitlin JM. [Ars Technica].; 2019 [hentet 2022. 01. 27. Link: <https://arstechnica.com/cars/2019/03/the-tesla-model-3-reviewed-finally/>.
11. Terjesen G. Grunnlag i drivverk og drivkraftteori. 2nd utg. Ås: NMBU/Realtek; 2021.
12. Hariram A, Koch T, Mårdberg B, Kyncl J. A Study in Options to Improve Aerodynamic Profile. sustainability; 2019.
13. IMI. THE IMPORTANCE OF ROLLING RESISTANCE IN HAULING TRUCKS. [Online].; 2018 [hentet 2022. 04. 13. Link: <https://www.imiproducts.com/blog/rolling-resistance-in-trucks/>.
14. ETRma. Industry Guideline on tyre labelling to promote the use of fuel-efficient and safe tyres with low noise levels. [Online].; 2011 [hentet 2022. 05. 09. Link: <https://www.etrma.org/wp-content/uploads/2019/09/2011-11-30-industry-guideline-on-tyre-labelling-vers3.pdf>.
15. x-engineer. Drivetrain losses (efficiency). [Online]. [hentet 2022. 05. 06. Link: <https://x-engineer.org/drivetrain-losses-efficiency/>.
16. Enge P, Enge N, Zoepf S. Electric Vehicle Engineering. 1st utg.: McGraw Hill; 2021.
17. Grøn Ø. [Store norske leksikon].; 2020 [hentet 2022. 02. 09. Link: <https://snl.no/lorentzkraften>.
18. Grøn Ø. [Store norske leksikon].; 2021 [hentet 2022. 02. 11. Link: https://snl.no/Coulombs_lov.
19. Sandstad J. [Store norske leksikon].; 2020 [hentet 2022. 04. 20. Link: https://snl.no/elektrisk_konstant.
20. Høyte F. [Store norske leksikon].; 2019 [hentet 2022. 02. 17. Link: <https://snl.no/synkronmotor>.
21. Kane M. [motor1].; 2020 [hentet 2022. 02. 18. Link: <https://uk.motor1.com/news/462107/video-tesla-model-3-electric-motor-explained/>.
22. Wildi T. Electrical Machines, Drives and Power Systems. 6th utg. Pearson , editor. Essex: Pearson Education Limited; 2014.
23. Vaske P, Moeller F. Elektriske maskiner og omformere. 1st utg. Kragerø: Universitetsforlaget; 1977.
24. Thiess M, editor. Automotive Handbook. 10th utg. Karlsruhe: Wiley; 2018.
25. Volcano Electric. Demagnetization Risk of Permanent Magnet Synchronous Motor. [Online].; 2020 [hentet 2022. 05. 11. Link: http://www.volcanomotor.com/news/demagnetization_risk_of_permanent_magnet_synchronous_motor-en.html.

26. US Department of Energy. [Alternative Fuels Data Center]. [hentet 2022. 02. 28. Link: https://afdc.energy.gov/vehicles/electric_batteries.html].
27. Battery University. [BU-306: What is the Function of the Separator?].; 2021 [hentet 2022. 03. 02. Link: <https://batteryuniversity.com/article/bu-306-what-is-the-function-of-the-separator>].
28. Goldie-Scot L. [BloombergNEF].; 2019 [hentet 2022. 03. 05. Link: <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/>].
29. Morris J. This Company Has The Battery Technology To Beat Tesla. [Online].; 2021 [hentet 2022. 03. 24. Link: <https://www.forbes.com/sites/jamesmorris/2021/09/04/this-company-has-the-battery-technology-to-beat-tesla/?sh=114c1e0d48f3>].
30. Korsmo H. Akselkombinasjoner. [Online].; 2021 [hentet 2022. 04. 11. Link: <https://snl.no/akselkombinasjoner>].
31. Statens Vegvesen. [Online]. [hentet 2022. 04. 11. Link: <https://www.vegvesen.no/kjoretoy/kjop-og-salg/import/kravveileder/veiledning/>].
32. Scania. [scania.com].; 2022 [hentet 2022. 03. 21. Link: <https://www.scania.com/no/no/home/products/trucks/battery-electric-truck.html>].
33. Nordström PE. Scanie Press info. [Online].; 2013 [hentet 2022. 03. 25. Link: <https://silo.tips/download/520-hp-2700-nm-at-1000-1300-r-min-egrscr-580-hp-2950-nm-at-1000-1350-r-min-egrsc>].
34. Soutwest Electronic Energy Corp. Lithium-Ion Information Guide. [Online].; 2022 [hentet 2022. 03. 25. Link: <https://www.swe.com/lithiumion/>].
35. Volvo Trucks. Volvo FL Electric. [Online].; 2019 [hentet 2022. 04. 08. Link: <https://brochures.volvotrucks.com/no/miljoe-og-alt-drivstoff/vtc-emob-onepager-final-fl-no/?page=1>].
36. Kane M. [INSIDEEVs].; 2019 [hentet 2022. 04. 08. Link: <https://insideevs.com/news/380848/volvo-trucks-launches-sales-electric-trucks/>].
37. Törnquist L. Volvo FL Electric: Hvordan fungerer det? [Online].; 2019 [hentet 2022. 04. 08. Link: <https://www.volvotrucks.no/no/news/magazine-online/2019/nov/tech-in-focus-volvo-fl-electric.html>].
38. Rob. Alcoa 22.5 x 8.25 Tractor Trailer wheel. [Online].; 2014 [hentet 2022. 03. 21. Link: <https://grabcad.com/library/alcoa-22-5-x-8-25-tractor-trailer-wheel-1>].
39. Nave R. Magnetic Field of Current Loop. [Online].; 2022 [hentet 2022. 05. 09. Link: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/curloop.html>].
40. what-when-how. TORQUE-SPEED CHARACTERISTICS – CONSTANT V/F OPERATION (Motors And Drives). [Online].; 2022 [hentet 2022. 05. 09. Link: <http://what-when-how.com/motors-and-drives/torque-speed-characteristics-constant-vf-operation-motors-and-drives/>].
41. electricmotorsport. AC-09 05.02 Induction Motor. [Online].; 2022 [hentet 2022. 05. 09. Link: <https://www.electricmotorsport.com/ac-09-05-02-induction-motor-mining-vehicle-motor-3-4-shaft-w-3-16-key-way-for-brake-end.html>].
42. heuver. 295/80R22.5 CONTINENTAL HYBRID HD3 152/148M TL M+S 3PMSF. [Online].; 2022 [hentet 2022. 05. 09. Link: <https://www.heuver.com/product/b29580225comhd301/295-80r22-5-continental-hybrid-hd3-152-148m-tl-m-s-3pmsf>].
43. Bosch. Automotive Handbook. 10th utg. Dietsche KH, Thiess M, editors. Karlsruhe: Wiley; 2018.
44. Skaar J. [Store norske leksikon].; 2021 [hentet 2022 02. 21. Link: https://snl.no/Faradays_induksjonslov].
45. Goodyear. EU tyre labelling 2021. [Online].; 2021 [hentet 2022. 05. 12. Link: https://www.goodyear.eu/en_gb/consumer/learn/eu-tire-label-explained.html].
46. BorgWarner. HVH410-150 Electric Motor. [Online].; 2016 [hentet 2022. 04. 23. Link: https://cdn.borgwarner.com/docs/default-source/default-document-library/remy-pds--hv410-150-sheet-euro-pr-3-16.pdf?sfvrsn=a642cd3c_11].
47. Lectura Specs. Scania P 250 B4x2NA. [Online].; 2022 [hentet 2022. 05. 09. Link: <https://www.lectura-specs.com/en/model/transportation/trucks-rigid-chassis-scania/p-250-b4x2na-11725831>].
48. Skaar J. [Store norske leksikon].; 2021 [hentet 2022. 02. 18. Link: https://snl.no/Faradays_induksjonslov].



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway