



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2022 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

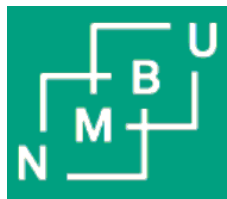
Drivverk og sikkerhetsmessige prinsipper i kjøretøy med brenselceller

Shalaw W. Rahman
Maskin-, Proses- og Produktutvikling

Drivverk og sikkerhetsmessige prinsipper i kjøretøy med brenselceller

av

Shalaw W. Rahman



M30-MPP Mastergradsoppgave
Fakultet for realfag og teknologi, NMBU
Våren 2022

FORORD

Denne masteroppgaven er skrevet av Shalaw Rahman ved fakultetet for realfag og teknologi (REALTEK) ved Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet (NMBU), våren 2022.

Bakgrunnen for rapporten er at NMBU ønsker å øke kunnskapen rundt kjøretøy med hydrogen som drivstoff i brenselceller, og det initieres derfor til en masteroppgave som har et overordnet fokus på kjøretøy med brenselcelleteknologi. Videre vil oppgaven ta for seg sikkerhetsmessige prinsipper ved slike kjøretøy og drivverksberegninger av brenselcellebilen (hydrogenbilen) Toyota Mirai 2.

For at leser skal få optimalt læringsutbytte av oppgaven, så forutsettes det at leser har en ingeniørfaglig teknisk bakgrunn, kombinert med en teknologisk og faglig interesse for kjøretøy. Det forventes videre at leser har grunnleggende kjøretøykunnskaper, spesielt innenfor drivkraftteori. I denne oppgaven benevnes «nye» og «gamle» Mirai, hvor dette hhv. referer til 1.- og 2. generasjons Toyota Mirai, som også benevnes hhv. Mirai 1 og Mirai 2. I oppgaven er det fokusert på store figurer med god lesbarhet og tilhørende tekst på samme side, noe som medfører at det noen steder er noe tomrom i oppgaven. Noen figurer består av engelske ord, som er forsøkt å være oversatt til norsk.

Oppgaven tar for seg en grundig utredning av brenselcelleteknologien basert hovedsakelig på Toyota Mirai 2. Deretter vil hydrogen gjøres rede for som vil være viktige bakgrunnskunnskaper for å forstå teorikapittelet om sikkerhetsmessige komponenter som blant annet fokuserer på kollisjonssikkerhet og hvordan dette tas hensyn til i hydrogenbilen Mirai. Det siste teorikapittelet tar for seg drivverk- og drivkraftteori som vil være utgangspunkt for drivverks- og drivkraftberegninger i kapittel 5.

Denne typen «state of the art»-masteroppgave, som fokuserer på utredning av den nyeste teknologiske utviklingen innenfor kjøretøy drevet av brenselceller, vil kunne være relevant å bruke for kommende ingeniørstudenter. og oppgaven vil følgelig ha et fokus på å være pedagogisk oppbygd.

Jeg vil rette en spesiell stor takk til min eminente veileder og førsteamanuensis Geir Terjesen, ved NMBU for solid veiledning gjennom hele prosessen, og Terje Wiltihl fra Toyota Norge som har vært en god informasjonskilde, diskusjonspartner samt bistått med utlån av utstyr og testkjøring av Mirai 2. Til slutt vil jeg takke mine nærmeste, og spesielt mine foreldre som ofret alt for å gi oss barna et trygt liv, med gode utdanningsmuligheter.

Drammen, den. 16. mai 2021

Shalaw W. Rahman

SAMMENDRAG

Denne masteroppgaven er skrevet som en del av masterprogrammet i Maskin-, Prosess- og Produktutvikling ved Institutt for maskinteknikk og teknologiledelse ved Norges Miljø- og Biovitenskaplige Universitet (NMBU). Instituttet er organisert under Fakultet for Realfag og Teknologi (REALTEK).

Instituttet vil styrke fagkunnskapen innenfor bærekraftig teknologi og null-utslippskjøretøy og har derfor initiert denne masteroppgaven hvor brenselcellebilen (hydrogenbilen), Toyota Mirai 2. generasjon har vært i fokus. Hensikten med oppgaven har vært å få kunnskap om brenselcellens virkemåte, bilens EI-motor, drivverk og også sammenlikne fysiske tester med teoretiske modelleringer. Dette er nyttig kunnskap for å få forståelse for hvordan slike kjøretøy kan modelleres. Oppgaven har altså omfattet litteraturstudium, estimering av parametere, fysiske tester av drivlinjen, sammenlikninger av resultatene fra teoretisk modellering og fysisk testing, diskusjoner med ressurspersoner og gjennomføring av spørreundersøkelse.

Myndighetenes mål er at nye personbiler og lette varebiler skal være nullutslippskjøretøy, dvs. elbiler og/eller hydrogenbiler fra 2025 [29]. Brenselcellebiler benytter hydrogen som drivstoff og resultatet er elektrisk spenning, som driver en elektrisk motor, som via drivverket sørger for bilens framdrift. Hydrogenet må være fremstilt på en miljøvennlig måte om bilen faktisk skal være et nullutslippskjøretøy. Dette innebærer at hydrogengassen må være produsert ved bruk av fornybare kilder, som eksempelvis solceller, vindkraft eller vannkraft. Per i dag er det en svært begrenset infrastruktur for hydrogenfylling i Norge og dette må også utbedres dersom hydrogenbiler skal kunne etableres som et attraktivt bilvalg i Norge.

De fire sikkerhetsmessige prinsippene som gjelder i hydrogenbilen, er å;

- 1) unngå lekkasje av hydrogengass, 2) oppdage og stanse lekkasjer med hydrogendetektorer, 3) unngå akkumulering av hydrogengass og 4) holde tenn kilder unna hydrogenkomponenter.

Masteroppgaven gir en grundig gjennomgang av brenselcelleteknologien som benyttes. De sentrale komponentene i hydrogenbilen er utredet, og sentrale komponenter i Mirai 2 er den elektriske motoren og drivverket som består av et reduksjonsgir og en differensial.

Jeg anbefaler følgende litteratur basert på nytteverdi og relevansen de har hatt for oppgaven:

- *Grunnlag i drivverk og drivkraftteori* [11]
- *Motorteknikk: Bilteknikk* [8]

Det er utviklet estimerte drivkraft-, moment- og effektkurver for Mirai 2 som kan benyttes til drivverk- og drivkraftberegninger. Disse beregningene kan hjelpe oss å forstå hvordan brenselcellebilen, i dette tilfellet Mirai 2, vil oppføre seg ved ulike kjøreforhold.

De fysiske testene har generelt sett samsvart godt med de teoretiske estimerte modellene. Spesielt har de estimerte moment- og effektkurvene som ble brukt til å beregne en teoretisk aksellerasjonstid fra 10 km/t til 96 km/t, har et prosentvis avvik på 1.1%, sammenliknet med tilsvarende aksellerasjonstid utført ved fysisk testkjøring av Mirai 2.

ABSTRACT

This MA-thesis is written as part of the master's program in Mechanical- Process and Product Development at the Institute of Mechanical Engineering and Technology Management at the Norwegian University of Life Sciences (NMBU). The institute is organized under the Faculty of Science and Technology (REALTEK).

The institute wants to increase the knowledge in sustainable technology and zero-emission vehicles, and therefore initiates to this MA-thesis that will focus on the Fuel Cell Vehicle (FCV) (hydrogen car), Toyota Mirai second generation. The purpose of the thesis is to gain knowledge about how FCVs operate, the FCV's electric motor, the drivetrain and also to compare physical tests with theoretical modelling. The thesis has thus included literature review, estimation of parameters, physical tests of the driveline, comparisons of the results from theoretical modeling and physical testing, discussions with resource persons and conducting a questionnaire.

The Norwegian government's goal is for new passenger cars and light trucks to be zero-emission vehicles, ie electric cars and/or hydrogen cars from 2025 [29]. FCVs use hydrogen as fuel and the result is electric voltage, which drives an electric motor, which via the drivetrain ensures the car's propulsion. For FCVs to be considered a zero-emission vehicle, the hydrogen must actually be produced in an environmentally friendly way. This means that the hydrogen gas must be produced using renewable sources, such as solar cells, wind power or hydropower. As of today, there is a very limited infrastructure for hydrogen filling in Norway and this must also be improved if hydrogen cars are to be established as an attractive car choice in Norway.

The four safety principles that apply in the hydrogen car are to;

1) avoid leakage of hydrogen gas, 2) detect and stop leaks with hydrogen detectors, 3) avoid accumulation of hydrogen gas and 4) keep ignite sources away from hydrogen components.

The MA-thesis provides a comprehensive review of the fuel cell technology used. The key components of the hydrogen car have been studied, and key components of the Mirai 2 are the electric motor and the drivetrain, which consists of a reduction gear and a differential.

I suggest the following literature based on its usefulness and relevance to this research project:

- Grunnlag i drivverk og drivkraftteori [11]
- Motorteknikk: Bilteknikk [8]

Estimated propulsion, torque and power curves have been developed for Mirai 2 that can be used for drivetrain and propulsion calculations. These calculations can help us understand how the fuel cell car, in this case the Mirai 2, will behave in different driving conditions.

In general, the results indicated that the physical tests corresponded well with the theoretically estimated models. In particular, the torque and power curves used to calculate a theoretical acceleration time from 10km/h to 96km/h had a percentage deviation of 1.1%, compared to the corresponding acceleration time compared at the physical test drive of the Mirai 2

INNHALDSFORTEGNELSE

INNHALDSFORTEGNELSE	1
1. INNLEDNING	3
1.1. Bakgrunn	3
1.2. Forurensing og motivasjon for hydrogen og el-drift	3
1.3. Problemstilling og utfordringer	4
2. PROSJEKTPLANLEGGING	5
2.1. Prosjekt målsettinger	5
2.1.1. Hovedmål	5
2.1.2. Delmål	5
2.2. Tids- og arbeidsplan med milepeler	6
2.3. Tidlige begrensninger for arbeidet	7
3. METODE	8
3.1. Terminologi og begreper	8
3.1.1. Symboler	8
3.2. Metodebruk og løsningsverktøy	10
3.3. Kvalitetssikring	11
3.4. Prosesstrinn	12
4. TEORI	13
4.1. Brenselcelleteknologi	13
4.1.1. Hva er en brenselcelle?	13
4.1.2. Utviklingsstatus og potensiale Toyota Mirai	13
4.1.3. Virkemåte PEM-brenselcelle	14
4.1.4. Varianter av brenselceller	17
4.1.5. Sentrale komponenter i en brenselcellebil	19
4.1.6. Fordeler og ulemper	26
4.1.7. Status, videreutvikling og forventninger fra produsentsiden.....	27
4.2. Hydrogen som drivstoff	29
4.2.1. Bakgrunn	29
4.2.2. Hydrogenproduksjon.....	29
4.2.3. Egenskaper	31
4.3. Sikkerhetsmessige prinsipper i hydrogenbiler	36
4.3.1. Bakgrunn	36
4.3.2. Fire sikkerhetsprinsipper i hydrogenbiler.....	37
4.3.3. Hydrogensikkerhet	38
4.3.4. Kollisjonssikkerhet med hydrogen og brenselcelle	39
4.4. Drivverk og drivkraftteori med fokus på brenselcellebil	41
4.4.1. En kort innføring i drivverk.....	41



4.4.2. Drivverkets hovedkomponenter i brenselcellebilen Mirai 2	42
4.4.3. Drivverksoversikt Toyota Mirai 2.....	46
4.4.4. Virkemåte for brenselcellebilen Mirai 2	47
4.4.5. Strømforsyning ved ulike kjøretilstander	49
4.4.6. Motorens dreiemoment og drivkraftbehov	50
Moment- og drivkraftbehovkurve for en bil med forbrenningsmotor:	50
4.4.7. Utsveklingsforholdet (i)	53
4.4.8. Teoretisk formelverk – Drivverk og drivkraftberegninger	54
4.4.9. Estimeringsmetode treghetsmoment hjul	56
4.4.10. Estimeringsmetode Luftmotstandskoeffisient	57
4.4.11. Estimeringsmetode Rullemotstandskoeffisient	57
5. RESULTATER.....	58
5.1. Teoretiske beregninger	58
5.2. Beregninger praktiske tester	77
5.2.1. Praktiske utførte beregninger Toyota Mirai 2	77
5.3. Usikkerhetsmomenter i beregninger	84
5.4. Forbedringspotensial i beregninger	85
6. EKSTERN KONSEPTEVALUERING	86
6.1. Hovedmål.....	86
6.2. Testpopulasjon og resultater	86
6.3. Resultattolkning	89
7. DISKUSJON	91
8. KONKLUSJON	96
8.1. Anbefalinger	98
8.2. Videre arbeid	98
REFERANSER	99
VEDLEGG.....	104

1. INNLEDNING

Hensikten med dette kapittelet er å introdusere leser for hovedtemaene i oppgaven og om oppgavens aktualitet både fra et ingeniørfaglig perspektiv, men også fra et miljø- og bærekrafts perspektiv.

1.1. Bakgrunn

Myndighetene stiller stadig større krav om en miljøvennlig og trafiksikker kjøretøypark. Fabrikantene konkurrerer derfor om å lage mer miljøvennlige kjøretøy med bedre kjøreegenskaper og sikkerhet. Toyota hevder at prisene på brenselceller er halvert siden 2007 og at vi med økt utvikling kan forvente å se brenselceller for hydrogen overalt. Myndighetene vil også satse på disse kjøretøyene. På ingeniørsiden er det nødvendig med kunnskap om brenselcelleteknologi, drivverk, kjøretøyparametere og sikkerhetsmessige prinsipper i disse kjøretøyene, slik at nødvendige vurderinger og beregninger kan bli gjort. Dette er nødvendig kunnskap for å modellere og designe nye kjøretøy. REALTEK ved NMBU ønsker å øke kunnskapen om kjøretøy med brenselceller, og vil derfor initiere en masteroppgave hvor kjøretøy med denne løsningen står i fokus.

Jeg anbefaler følgende litteratur basert på nytteverdi og relevansen de har hatt for oppgaven:

- *Grunnlag i drivverk og drivkraftteori* [11].
- *Motorteknikk: Bilteknikk* [8]

1.2. Forurensing og motivasjon for hydrogen og el-drift

Den uavhengige miljøstiftelsen Bellona, som arbeider med å løse verdens klima- og miljøproblemer uttrykker stor glede over at Enova støtter utviklingen av hydrogenindustri. Dette på bakgrunn av at det i slutten av 2021 ble offentliggjort at Enova skal dele ut en milliard kroner til hydrogenprosjekter, blant annet hos Yara [28].

Ifølge Nasjonal transportplan (NTP) for 2018 – 2029 så skal nye personbiler og lette varebiler være nullutslippskjøretøy, dvs. el-biler og hydrogenbiler fra 2025 [29]. Transportøkonomisk institutt (TØI) konkluderer i en rapport med at disse ambisiøse målene vil være både meget krevende og kostbare, men at det er oppnåelige mål. Det er dog i følge TØI personbilmålet som er det mest krevende ettersom det er flere teknologiske og praktiske utfordringer. Når det gjelder hydrogenbiler handler disse utfordringene særlig om at det er et lavt produksjonsvolum og at det ikke finnes en landsdekkende infrastruktur for hydrogenstasjoner [30]. Statens vegvesen anerkjenner også at det mangler hydrogenstasjoner i store deler av landet [31]. Dette kan tenkes å være en av de store utfordringene forbrukere vil ha før man eventuelt velger å gå over til hydrogenbiler.

Allerede i 2004 så skrev D. Hart, i «Encyclopedia of Energy» at det på lang sikt sannsynligvis vil være slik at hydrogenenergi-teknologi vil erstatte mange konvensjonelle teknologier [32]. Den 20. april 2015 rullet elbil nr. 50 000 ut fra Drammen Havn og antallet elbiler utgjorde på daværende tidspunkt 2 prosent [33]. Antallet elbiler i Norge ved utgangen av 2021 var ifølge Statistisk sentralbyrå (SSB) 460 734 og utgjorde 35,5 prosent av bilparken [34]. Dette kan tyde på at folk er åpne for forandring, selv om en ny type bilteknologi kan møtes med skepsis



i starten. Videre skriver D. Hart [32] at økonomien knyttet til denne typen hydrogenteknologi vil forbedres jo mer denne teknologitypen benyttes og at verdien av det lave utslippet bør videre gi en økt verdi for slike systemer. Dette kan oppsummert antas å være optimistiske prognoser for utviklingen og eventuelt etableringen av brenselcelledrevne kjøretøy (hydrogenbiler).

1.3. Problemstilling og utfordringer

Problemstilling/oppdragsbeskrivelse for denne masteroppgaven er:

Ta utgangspunkt i Toyota Mirai 2 og gjør en utredning av brenselcelleteknologien som ligger til grunn for biler med brenselceller, drevet av hydrogen som drivstoff, hvor det redegjøres for sentrale komponenter samt hvordan disse bilene operer ved ulike kjøretilstander. Redegjør for de sikkerhetsmessige prinsippene som ligger til grunn for at disse bilene kan betraktes å være trygge, og deretter drivverket i disse bilene, samt drivverks- og drivkraftberegninger som kan bidra til å utvikle forståelse for kjøreegenskapene til slike biler.

Utfordringer/flaskehals

- Visse tekniske data, er krevende å fremskaffe ettersom det har blitt uttrykt at det er konfidensielle data [35]. Det vil derfor blant annet gjøres estimering av parametere for å finne slike verdier med utgangspunkt i estimeringsmetoder, samt tekniske data som gjelder andre tekniske og fysisk liknende biler.
- Den rullende landeveien som skulle brukes blant de fysiske testene av Toyota Mirai 2 til å lage effekt- og momentkurven viste seg å være i ustand. Derfor må disse kurvene utvikles og lages på andre måter.
- Covid-pandemien har gjort at fysiske møter med samarbeidspartner Toyota Norge AS har vært utfordrende.
- Det erfarer at det finnes mer fagstoff tilgjengelig ute på internett (informasjon, artikler osv.) om Mirai 1, enn det finnes om Mirai 2. I møte med teknisk instruktør i Toyota Norge, Terje Wiltihl, så ble jeg fortalt at mye av det som gjelder i Mirai 1 også gjelder i Mirai 2 [35]. Følgelig vil masteroppgaven suppleres med informasjon fra Mirai 1.

Avgrensninger

Oppgavens teoretiske innhold er i utgangspunktet omfattende nok til å lage individuelle masteroppgaver om temaene som blir utredet i teoridelen. Hensikten med denne masteroppgaven er dog å skrive en pedagogisk oppbygd oppgave som tar for seg de nevnte temaene slik at kommende maskiningeniørstudenter kan ha gleden av å øke kunnskaper og regneferdigheter innenfor disse temaene.

- Oppgaven avgrenses til ikke å gå i dybden av verken det elektrotekniske eller kjemiske aspektet ved brenselcellebiler.
- Formelverket som presenteres i masteroppgaven er også forutsatt at leser forstår og det vil ikke gis noen omfattende forklaringer på formler presentert i denne oppgaven.
- Oppgaven begrenses til å fokusere på brenselcellebilen Toyota Mirai, hovedsakelig fordi jeg har fått tilgang til Toyota sin tekniske database; TechDoc, og vil i begrenset grad omtale andre brenselcellebiler.

2. PROSJEKTPLANLEGGING

Hensikten med dette kapittelet er å bli bevisst over de eksisterende hovedmål og delmål ved prosjektet, samt få en systematisk oversikt som gjøre det mulig å kvalitetssikre og kontrollere progresjonen i prosjektarbeidet. Det er også av interesse å avklare tidlige begrensninger for å kunne finne løsninger på disse tidligst mulig.

2.1. Prosjekt målsettinger

2.1.1. Hovedmål

Hovedmålet for masteroppgaven er fra et ingeniørfaglig ståsted å øke kunnskapene rundt brenselcelleteknologien i brenselcelledrevne biler med hydrogen som drivstoff. Dette skal gjøres, med fokus på Toyota Mirai 2, ved å gjøre en utredning av brenselcelleteknologien, de sikkerhetsmessige prinsippene, samt drivverk- og drivkraftutredning for å kunne gjøre beregninger og modelleringer av slike biler.

2.1.2. Delmål

Delmålenes funksjon er å konkretisere de aktivitetene som totalt sett vil utgjøre hovedmålet.

1. Gjør rede for brenselcelleteknologi, deriblant utviklingsstatus i Toyota Mirai, potensialet til brenselcelleteknologien, varianter av brenselcellen og virkemåten i brenselcellebiler.
2. Gjør rede for hydrogen, deriblant produksjonen av hydrogengass og egenskaper ved hydrogen som gir en kunnskapsbase som vil være viktig for å forstå miljø- og bærekraftaspektet ved slike biler, samt være en viktig kunnskapsbase for å forstå den sikkerhetsmessige utredningen i hydrogenbiler.
3. Gjør rede for sikkerhetsmessige prinsipper i hydrogenbiler for å danne en kunnskapsbase som gir oss en forståelse av hvordan sikkerhet ivaretas i hydrogenbiler (brenselcellebiler) og hva slags overordnede prinsipper som er implementert i slike kjøretøy for å sikre trygghet, deriblant ved eventuelle kollisjoner.
4. Gjør rede for drivverket til brenselcelledrevne biler med utgangspunkt i Mirai 2 for å forstå hvordan brenselcelledrevne biler opererer.
5. Legg fram et teoretisk drivkraft-formelverk som muliggjør å utvikle effekt-, moment- og drivkraftdiagrammer for Toyota Mirai 2.
6. Gjennomfør fysisk testkjøring og praktiske tester av Toyota Mirai 2 blant annet for å estimere parametere som hjulets massetregningsmoment, rullestands-, luftmotstandskoeffisienten Toyota Mirai 2.
7. Utfør beregninger (teoretiske og praktiske), samt gjennomføre spørreundersøkelse.
8. Ferdigstille masteroppgave og presentasjon.

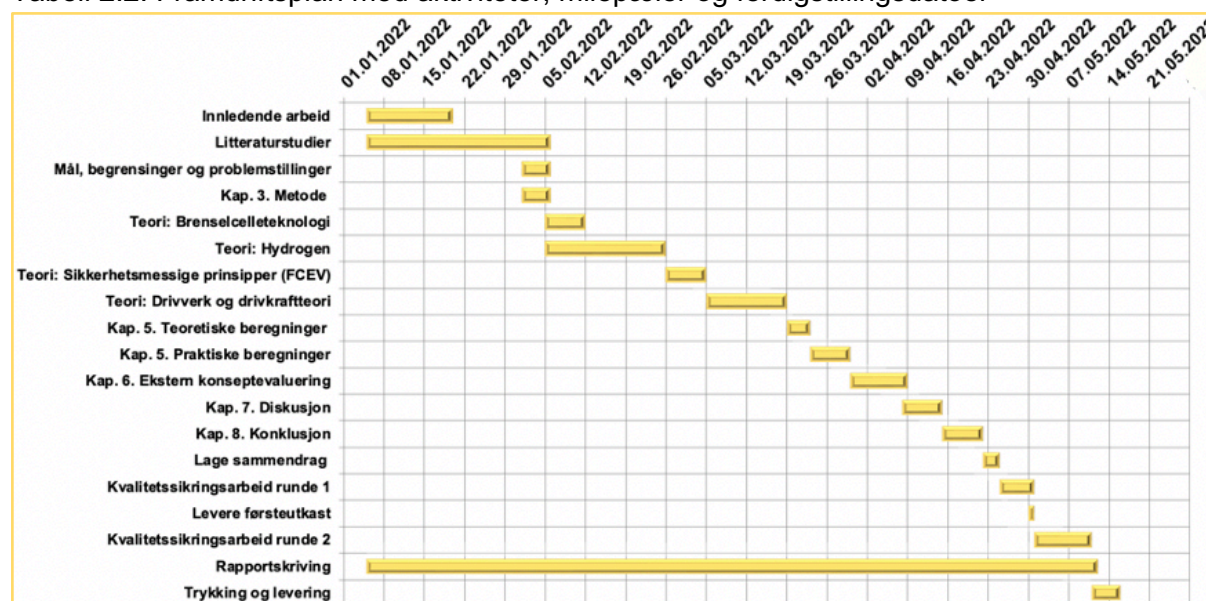
2.2. Tids- og arbeidsplan med milepeler

Under vises en oversikt over aktiviteter med startdatoen, varigheten til aktiviteten (antall dager), samt ferdigstillingsdatoer. Aktivitetsoversikten er relatert til framdriftsplanen som vises på neste side.

Tabell 2.1: Aktivitetsoversikt med ferdigstillingsdatoer

Aktivitet	Start Dato	Varighet (dager)	Sluttdato
Innledende arbeid	05.01.2022	15	20.01.2022
Litteraturstudier	05.01.2022	32	10.02.2022
Mål, begrensinger og problemstillinger	01.02.2022	5	05.02.2022
Kap. 3. Metode	01.02.2022	5	05.02.2022
Teori: Brenselcelleteknologi	05.02.2022	7	12.02.2022
Teori: Hydrogen	05.02.2022	21	25.02.2022
Teori: Sikkerhetsmessige prinsipper (FCEV)	26.02.2022	7	04.03.2022
Teori: Drivverk og drivkraftteori	05.03.2022	14	18.03.2022
Kap. 5. Teoretiske beregninger	19.03.2022	4	22.03.2022
Kap. 5. Praktiske beregninger	23.03.2022	7	29.03.2022
Kap. 6. Ekstern konseptevaluering	30.03.2022	10	07.04.2022
Kap. 7. Diskusjon	08.04.2022	7	14.04.2022
Kap. 8. Konklusjon	15.04.2022	7	21.04.2022
Lage sammendrag	22.04.2022	3	24.04.2022
Kvalitetssikringsarbeid runde 1	25.04.2022	6	30.04.2022
Leverer førsteutkast	30.04.2022	1	01.04.2022
Kvalitetssikringsarbeid runde 2	01.05.2022	10	10.05.2022
Rapportskriving	05.01.2022	127	11.05.2022
Trykking og levering	11.05.2022	5	15.05.2022

Tabell 2.2: Framdriftsplan med aktiviteter, milepæler og ferdigstillingsdatoer



Framdriftsplanen i tabellen viser progresjonen som er planlagt i forhold til aktivitetene i tabell 2.1 på forrige side. Tabell 2.2 viser på en oversiktlig måte hvilke aktiviteter som overlapper hverandre og lengden på aktivitetenes varighet, på en tydelig måte. Dersom det er ønskelig å se et forstørret bilde av tabell 2.2, se vedlegg [V1].

2.3. Tidlige begrensninger for arbeidet

1. Oppgaven begrenser seg til hovedsakelig å ta utgangspunkt i Toyota sin hydrogendrevne bil, Mirai 2.
2. Noen av de tekniske verdier som er viktig i forbindelse med de teoretiske beregningene er utfordrende å fremskaffe, og i tillegg til så er flere tekniske verdier jeg har ettspurt, konfidensielle data [35]. Dette vil kunne påvirke nøyaktigheten i drivverk- og drivkraftberegningene. Følgelig vil det for å fremskaffe disse parametriske verdiene gjøres visse forenklinger, eksempelvis at verdien for drivverkets virkningsgrad vil innhentes fra en annen el-motor, hvor denne verdien er kjent.
3. Det er utfordrende å finne gode og bidragsgivende vitenskapelige artikler, avhandlinger eller teknisk informasjon om brenselcellebilen Mirai 2, særlig på norsk. Derfor foreligger det et begrenset teorigrunnlag jeg kan bruke som sammenlikningsgrunnlag i masteroppgaven.
4. Det vil ikke være mulig å estimere moment- og effektkurver fysisk ved hjelp av rulledynamo grunnet defekt maskin.

3. METODE

Hensikten med metodekapittelet er at det legger rammer og setter føringer for utførelsen av masterprosjektet. I tillegg til dette gir metodekapittelet leser en oversikt over begreper og symboler i masteravhandlingen.

3.1. Terminologi og begreper

Tabell 3.1: Liste over relevant terminologi og begreper brukt i oppgaven med tilhørende beskrivelse.

Begreper	Beskrivelse
Brenselcellebil	Brenselcellebil, også kalt hydrogenbil/ brenselcelledreven bil/ brenselcelle-elektrisk bil, er en bil drevet av den elektriske spenningen som genereres inni bilens brenselcelle, hvor hydrogengass brukes som drivstoff.
AC	Vekselstrøm forkortes ofte til AC (Alternate Current)
DC	Likestrøm forkortes ofte til DC (Direct Current)
FC	Fuel Cell – Brenselcelle
Drivverk	Drivverket i en bil defineres som de komponentene som overfører motorens dreiemoment til drivhjulene [4].
Motoreffekt	Motorens effekt. også bare referert til som «effekt» i denne oppgaven, beskriver effekten motoren produserer ved bestemte turtall ved fullt gasspådrag.
Sporvidde	Sporvidden til en bil er bredden til bilen minus halve bredden til hvert av hjulene. Dette fordi sporvidden betraktes som avstanden mellom midtpunktene (sette forfra) til forhjulene.
Retardasjon	Retardasjon er det samme som negativ akselerasjon og oppstår når bilen aktivt benytter bremses, eller når bilen bremses (saknes) grunnet diverse motstander. Enhet er m/s^2 .

3.1.1. Symboler

Tabellen under inneholder symbolene brukt ved beregninger, slik at leser kan slå opp i tabell 3.2 ved usikkerhet rundt hva et symbol betyr.

Tabell 3.2: Liste over symboler med tilhørende betydning og enhet

Symbol	Betydning	Enhet/ benevning
A	Bilens tverrsnittareal	m^2
a	Akselerasjon, retardasjon	
a_x	Hjulsenterets akselerasjon i x-retning	m/s^2
C_w	Luftmotstandskoeffisient	-
F_A	Akselerasjonsmotstand	N
F_{Hjul}	Skyvekraft på drivhjulene	N
F_L	Luftmotstand	N
$F_{motst.}$	Den samlede totale motstandskraften:	N

Tabell 3.2: forts.

Symbol	Betydning	Enhet/ benevning
F_R	Rullemotstand	N
F_S	Stigningsmotstand	N
F_{Total}	Den totale kjøremotstanden	N
G_{bil}	Totale tyngden av bilen	N
g	Tyngdeakselerasjonen	m/s^2
$I_{Ett-Hjul}$	Massetreghetsmomentet til ett hjul	kgm^2
I_{Hjul}	Massetreghetsmomentet til alle fire hjul	kgm^2
I_M	«Massetreghetsmomentet til: motor, svinghjul, kopling og inngående giraksel» [4]	kgm^2
I_{me}	«Massetreghetsmomentet til delene mellom girkasse og differensial: mellomaksel, universal ledd, utgående giraksel og pinjong» [4]	kgm^2
i_d	Uttevklingsforhold i differensial	-
i_{total}	Det totale uttevlingsforholdet mellom motor og hjul	-
M_{motor}	Motorens dreiemoment	Nm
m_{bil}	Masse av bil	kg
m_{ekv}	Den ekvivalente massen (totale massen) til bilen når roterende masse omgjøres til translatorisk (lineær) beveget masse.	kg
N_{rpm}	Motorturtall	RPM, rpm, Omdr/min, r/min
n_M	Motorturtall	RPM, rpm, Omdr/min, r/min
n_n	Turtallet i RPM til hhv. drivende ($n=1$) og drevet aksel ($n=2$)	RPM, rpm, Omdr/min, r/min
n_x	Inngående ($x = inn$) eller utgående ($x = ut$) turtall	RPM, rpm, Omdr/min, r/min
P_{total}	Nødvendig effektbehov ved drivhjulene	kW
P_{hk}	Motoreffekten i hestekrefter	hk
R	Hjulradius (evt. dynamisk hjulradius)	m
r_n	Radiusen til hhv. drivende ($n=1$) og drevet aksel ($n=2$)	m
r_m	Middelradiusen til til «hjulringen»	m
Stign(%)	Den prosentvise stigningen	%
s	Strekning (avstand)	m
T_{Nm}	Motormomentet	Nm
t	Tid	s
v_n	Periferihastigheten i kontaktpunktene til hhv. drivende ($n=1$) eller drevet ($n=2$) aksel.	

Tabell 3.2: forts.

Symbol	Betydning	Enhet/ benevning
v	Bilens hastighet	m/s, km/t
V_x	$X = 0$: vindhastighet; $X = 1$: bilens hastighet	m/s, km/t
X	Korreksjonsfaktor	-
Z_n	Antall tenner til hhv. drivende ($n=1$) eller drevet ($n=2$) tannhjul.	-
α	Vinkelen til en stigning	Radianer [Rad], grader [$^\circ$]
β	Vinkelen til skråplanet	grader [$^\circ$]
f	Rullestandscoeffisient	-
η	Drivverkets virkningsgrad	-
ρ_{luft}	Tetthet i luft	kg/m ³

3.2. Metodebruk og løsningsverktøy

Litteraturstudie:

- Gjennom litteraturstudie har jeg sett på diverse artikler, avhandlinger, internettkilder, bøker, osv. Som jeg har brukt som grunnlag for gjennomføringen av denne masteroppgaven.
- Teknisk Instruktør på Toyota Norge, Terje Wiltihl [35] har gitt meg tilgang til TechDoc [13] som er Toyotas tekniske database. Ved å skrive inn VIN-nummeret til en Mirai 2, klikke på «Søk» og deretter «Nye bilfunksjoner», så har jeg fått opp en side med diverse menyknapper som tar for seg ulike kategorier, for eksempel: «Drivetrain», «Engine» osv.

Spørreundersøkelse og eksterne ressurser:

- Det gjennomføres en spørreundersøkelse for å innhente tilbakemeldinger, perspektiver og tanker fra eksterne mennesker. Respondentene fra spørreundersøkelsen tilegnes gruppenavnet: «Testpopulasjonen». Spørreundersøkelsen ligger i vedlegg [V3], og spørreundersøkelsens resultater og resultatdrøfting er dekket i kapittel 6.
- Terje Wiltihl [35] er teknisk instruktør i Toyota Norge og benyttes som ekstern ressursperson/ ekspert i masteroppgaven. T. Wiltihl har en spesielt god kompetanse når det gjelder hydrogenbilen Toyota Mirai, samt at han har unik innsikt i bilbransjen, som en sentral person i Toyota Norge.



Fysiske/ praktiske tester

- Det er gjort diverse praktiske tester for å estimere hastighetskurver, luftmotstandskoeffisient og rullestandskoeffisient, med utgangspunkt i testkjøring av en Toyota Mirai 2, sammen med Terje Wiltihl [35], den 08.04.2022.
- Det er gjort fysiske tester av et av hjulene til en Toyota Mirai 2 i forbindelse med estimering av dets massetregghetsmoment.

Programvarer

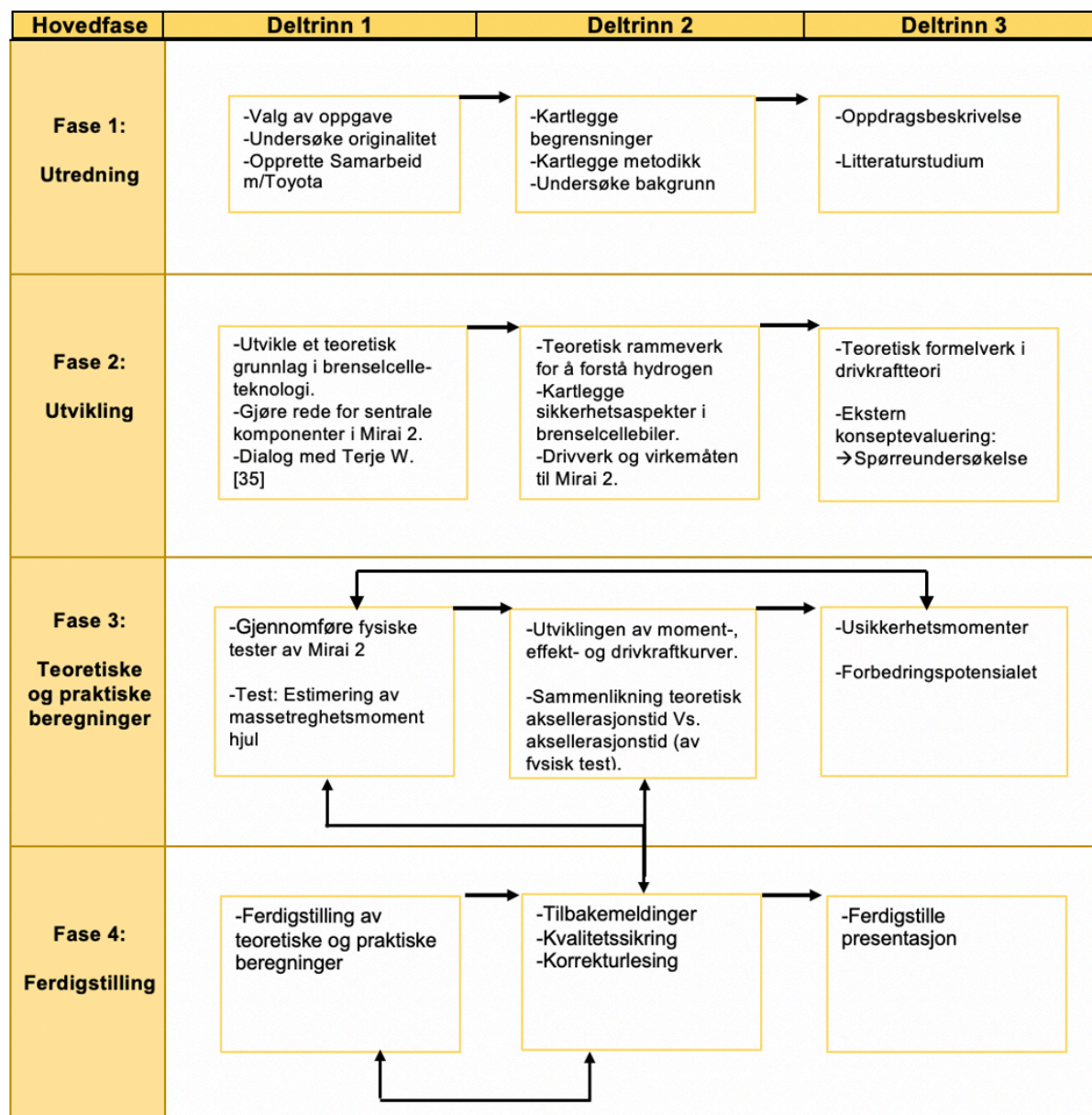
1. Microsoft Word 2021 – Brukes i forbindelse med skriving av masteroppgaven, samt lage boks-figurer og prosessdiagram.
2. Microsoft Excel 2021 – Brukes til å lage framdriftsplan, graftegning og til å lage kakediagrammene (sektordiagrammene) i testundersøkelsen.
3. GeoGebra Classic 6 – Brukes til å tegne kurver og diagrammer
4. GTS TechStream – Brukes i forbindelse med den fysiske testkjøringen av Mirai 2, hvor det i ettertid ble hentet ut for eksempel hastighetskurver estimert under testkjøringen.

3.3. Kvalitetssikring

Jeg har gjennom jevnlig kontakt med veileder vurdert kvaliteten av oppgavens innhold. Oppgaven er kvalitetssikret gjennom at den to ganger er korrekturlest og undersøkt for korrekt nummerering av figurer og formler. Korrekt angivelse av sidetall er gjort og liste over symboler er kontrollert for å sjekke at alle symboler er inkludert. De teoretiske beregningene er også kontrollert to ganger.

3.4. Prosesstrinn

Nedenfor vises et prosessdiagram som tar for seg sentrale trinn i prosessen i dette masterarbeidet. Prosessdiagrammet vil være grunnlag for diskusjon i forhold til hvordan prosessen har vært i arbeidet med denne masteroppgaven.



Figur 3.1: Oversikt over prosesstrinn i masteroppgaven

4. TEORI

Hensikten med teorikapittelet er å øke leserens forståelse og kunnskaper om brenselcelledrevne kjøretøy med hydrogen som drivstoff (hydrogenbiler). For å oppnå dette gjøres det rede for brenselcelleteknologi, hydrogen, sikkerhetsmessige prinsipper i hydrogenbiler, samt drivverk og drivkraftteori med fokus på Mirai 2.

4.1. Brenselcelleteknologi

For å få en pedagogisk oppbygd forståelse for hvordan brenselceller og brenselcelleteknologi fungerer, så er det viktig kort å redegjøre for hva brensel er [36]. Brensel er et materiale som gjennom forbrenning eller andre prosesser kan omdannes til nyttig energi. Prosessene kan være fisjon/fisjon i en kjernereaksjon, forbrenning av for eksempel ved, eller det som er tilfellet i en brenselcelle; en kjemisk reaksjon. Den «nyttige energien» i en brenselcelle blir følgelig den elektriske energien som genereres i brenselcellen.

4.1.1. Hva er en brenselcelle?

En brenselcelle er en enhet som fungerer som en elektromagnetisk omformer (converter) som direkte omformer den kjemiske energien lagret i brensel, til elektrisk energi [37]. Brenselcellen genererer altså elektrisitet ved hjelp av en kjemisk reaksjon mellom oksygen og hydrogen, som kan utnyttes eksempelvis til å drive en elektrisk motor i en bil.

Det finnes en rekke kommersielle brenselceller som benyttes i ulike sammenhenger til ulike formål. Disse kommer i ulike varianter og størrelser, hvor noen av disse presenteres og beskrives i kapittel 4.1.4. Brenselcellen som benyttes i den hydrogendrevne bilen Mirai, kalles en proton-utveksling-membran brenselcelle, også kalt polymerelektrolyttmembran brenselcelle (PEM-brenselcelle). For å unngå eventuelle misforståelser er det viktig å vite at denne typen brenselcelle også har andre benevnelser på engelsk, deriblant PEM (polymer-electrolyte membrane, PEFC (polymer electrolyte fuel cell) eller SPFC (solid polymer fuel cell). Den kjemiske reaksjonen i PEM-brenselcellen blir beskrevet i kapittel 4.1.3.

4.1.2. Utviklingsstatus og potensiale Toyota Mirai

Toyota Industries Corporation skriver at Japanske myndigheter har etablert som mål om å ha et nullkarbon-samfunn innen 2050. Videre skriver de at klimaendringer er et av de viktigste sakene som vil berøre alle verdens nasjoner, og at utviklingen av hydrogendrevne biler vil være de optimale bilene med hensyn til klima og miljø [18].

Toyota Mirai startet i 1992 utviklingen av brenselcelleteknologi i biler, med hydrogen som brensel (drivstoff) [17]. Hydrogenbiler har dog vært et polariserende tema og skapt store diskusjoner. Ifølge en artikkel publisert i Teknisk Ukeblad så har «Elon Musk tidligere uttrykt at han mener dette er en svært lite effektiv måte å bruke energi på, mens hydrogeninvestor Øystein Stray Spetalen har fremhevet at effektiviteten ikke spiller noen rolle så lenge hydrogenet fremstilles av overskuddsenergi». Videre påpeker Teknisk Ukeblad det at de begge har begge økonomiske interesser på hvert sitt område [56].

Toyota sin visjon er imidlertid at i et bærekraftig hydrogensamfunn, så er hydrogen en viktig energikilde både ved bruk og lagring av energi [17].

Et nøkkelord i Toyota sin utvikling av ny teknologi har vært hybridteknologi som klassisk sett kan defineres som kombinasjonen av forbrenningsmotorer og elektriske motorer i en og samme bil. Jeg erfarer at det å lese om hydrogenbilen Mirai kan være preget av hybridbegrepet. Dette antakeligvis fordi det beskrives, blant annet i TechDoc [13], at bilens elektriske motor kan få tilført elektrisitet både fra brenselcellen og fra høyspenningsbatteriet. En kombinasjon av disse to er slik jeg tolker det, det som er grunnen til at «hybrid» brukes. For å unngå forvirring blant lesere av denne oppgaven så understrekes det, på bakgrunn av den klassiske definisjonen av hybridteknologi skrevet ovenfor, at Toyota Mirai ikke vil defineres eller omtales som en hybridbil i denne oppgaven. For ordens skyld så er det viktig å være observant og kritisk til bruk av denne typen betegnelse når en leser om brenselcellebilen.

Toyota Mirai kommer i to generasjoner hvor den første generasjonen ble lansert i 2014, og den andre i 2021. Den nyeste generasjonen er veldig ulik den første generasjonen i design, og er utviklet og forbedret på en rekke områder; deriblant økt antall seter (fra fire til fem) og økt kjøre-rekkevidden. Sjefingeniør Yoshika Tanaka i Toyota Motor Corporation (Toyota) uttalte at målet med Toyota Mirai er at kundene skal si at de valgte denne bilen (Toyota Mirai) fordi de hadde et ønske om denne bilen, og at den deretter tilfeldigvis viste seg å være en brenselcelle-dreven bil [48].



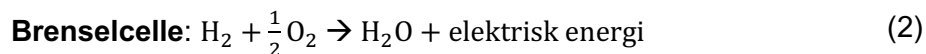
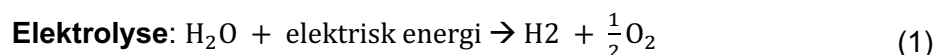
Figur 4.1. Til venstre: Mirai 1. Generasjon [49] og til høyre: Mirai 2. Generasjon [48].

I Toyota sin visjon om nullkarbon-utslipp står brenselcelleteknologien sentralt og Toyota tror hydrogenbiler har potensialet til å være nullkarbonutslippskjøretøy, og at brenselcelleteknologien kan benyttes i drivlinjen til andre transportmidler også, eksempelvis fly, tog og skipsfarttøy. I tillegg til dette så skriver Toyota også at brenselcelleteknologien også har potensialet til å benyttes i til kraftgenerering i industri, virksomheter og i hjem [17].

4.1.3. Virkemåte PEM-brenselcelle

For å forstå hvordan PEM-brenselcellen i Toyota Mirai virker er det fundamentalt å ha en forståelse for den kjemiske reaksjonen som oppstår i brenselcellen. Den kjemiske reaksjonen kan tolkes som en motsatt elektrolyse. I en elektrolyse vil vann og elektrisk energi reagere og produsere hydrogen og oksygenmolekyler. Denne reaksjonen (elektrolysen) skjer i en elektrisk ledende væske, elektrolytten. En brenselcelle operer og baserer seg på den motsatte reaksjonen til en elektrolyse, nemlig ved at hydrogen- og oksygenmolekyler reagerer og danner elektrisk energi og vann [8].

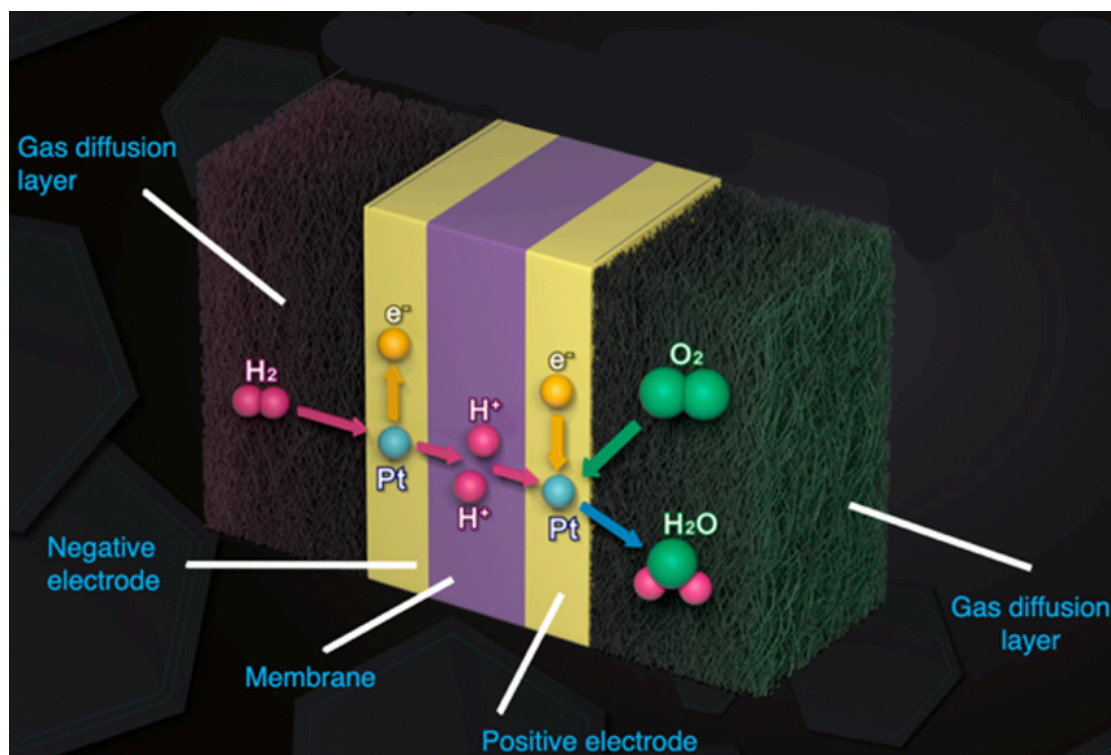
Under vises den kjemiske reaksjonen i en elektrolyse og i en brenselcelle [8]:



I tabell 4.1 beskrives prosessen i PEM-brenselcellen som benyttes i Mirai. Figur 4.2 under hører må sees i sammenheng med beskrivelsene i tabell 4.1.

Tabell 4.1: Prosessen i en PEM-brenselcelle

Rekkefølge	Beskrivelse
1	Hydrogengass (H_2 (g)) injiseres fra hydrogentankene, går gjennom et gassdiffusjonslag og deretter spaltes i den negative elektroden til elektroner (e^-) og protoner (H^+).
2	Elektronene vil gå gjennom en ytre elektrisk krets (ikke tegnet inn i figur 4.2) og vil skape en elektronstrøm som kan utnyttes til å drive for eksempel en EI-motor som i sin tur kan skape framdrift på bilen.
3	H^+ vil gå gjennom membranen og gjennom til den positive elektroden. Her vil elektronene fra den elektriske kretsen reagere møte protonene og danne hydrogen
4	Oksygen, O_2 (g), inntas fra atmosfæren og vil reagere med hydrogenet og danne vann (H_2O).



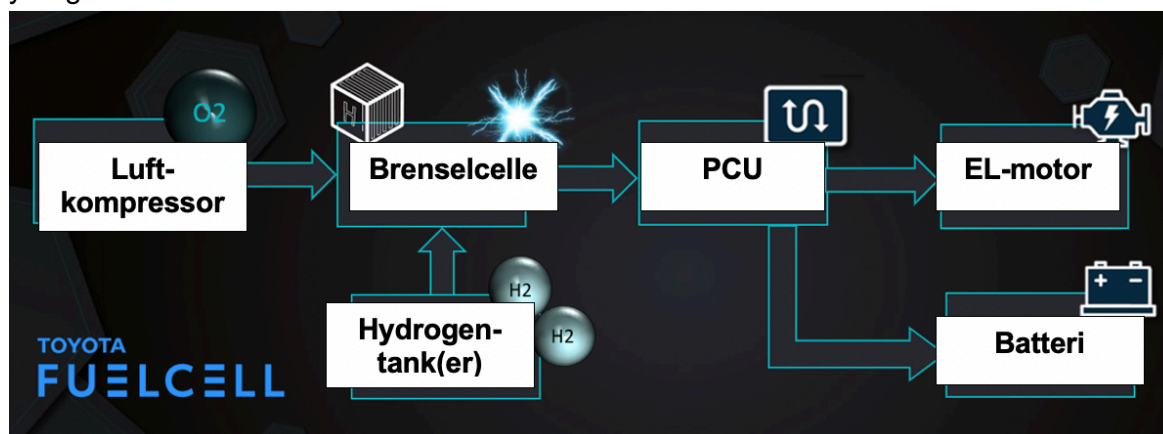
Figur 4.2: Design av PEM-brenselcellen [3]

I tabellen under presenteres en kortversjon, samt utvidende beskrivelse av prosessen hvor elektrisitet genereres i brenselcellebilen, med utgangspunkt i Mirai.

Tabell 4.2: Forklaring av generering av elektrisitet i Mirai

Rekkefølge	Kort beskrivelse	Utvidende beskrivelse
1	Oksygen sendes til brenselcellen	Oksygen tas opp fra atmosfæres og sendes gjennom en luftkompressor til brenselcellen.
2	Kjemisk reaksjon oppstår i brenselcellen og produserer elektrisk energi og vann.	Hydrogengass fra de tre hydrogentankene sammen med oksygen fra atmosfæren vil i brenselcellen reagere kjemisk, slik beskrevet i kapittel 4.1.3. Resultatet av dette er skapes elektrisitet samt H ₂ O.
3	Den genererte elektrisiteten sendes til den elektriske motoren.	Elektrisiteten som genereres i brenselcellen vil både kunne bidra til å drive EI-motoren, samt kunne sendes til høyspennings-batteriene dersom det genereres for mye spenning (restspenning/overflødig spenning)
4	Elektriske motoren driver hjulene	EI-motoren som nå drives av den genererte spenningen i brenselcellen, kan nå drive drivhjulene. Avhengig av ønsket hastighet og akselerasjon, vil brenselcellebilen enten kun være drevet av elektrisk energi fra brenselcellen og/eller elektrisk energi fra brenselcellen og høyspenningsbatteriene.
5	Vann går ut av bilen.	Etter den kjemiske reaksjonen i brenselcellen så vil vann være avfallsstoffet som kommer ut av bilen.

Figuren 4.2. under illustrerer en forenklet prinsipptegning fra Toyota om hvordan biler med brenselceller virker. Det illustreres at det etter generering av elektrisk energi i brenselcellen (Fuel Cell Stack), så sendes den elektriske energien til kraftkontrollenheten (Power Control Unit, PCU) som styrer hvor mye av den genererte elektriske energien som skal sendes til EI-motor og til høyspenningsbatteriet. I kapittel 4.4.3. presenteres drivverket til Mirai 2, hvor det gjøres rede for virkemåten til drivverkskomponentene og en teknisk forklaring på hvordan hydrogenbilen virker.



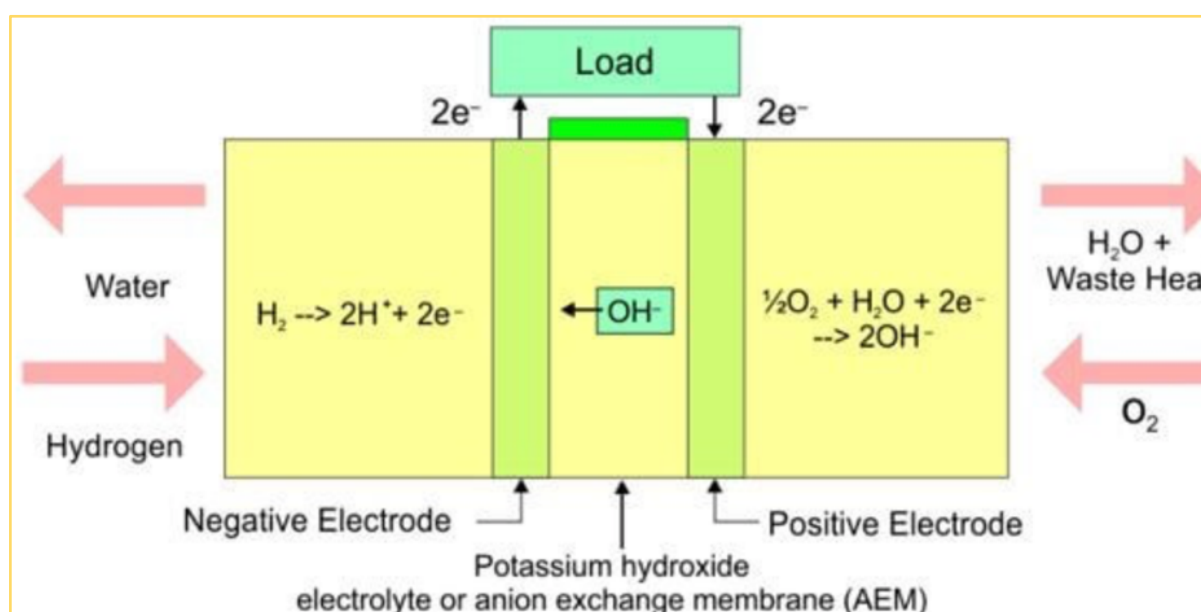
Figur 4.3: Prinsipptegning virkemåte til noen hovedkomponenter i Toyota Mirai [3]

4.1.4. Varianter av brenselceller

Hensikten med dette delkapittelet er å presentere noen typer brenselceller for å se og forstå at poenget med brenselceller er å lage en elektrisk krets. Denne elektriske kretsen skal kunne utnyttes eksempelvis til å drive en elektrisk motor. Det er også viktig å forstå at den elektriske kretsen genereres av den kjemiske reaksjonen i brenselcellen, og at hvilke stoffer som benyttes i selve reaksjonen i brenselcellene kan variere.

Alkaliske brenselceller (Alkaline Fuel Cells, AFC) [39]

Alkaliske brenselceller (figur 4.4. under) er brenselcelleteknologi som var blant de tidligste brenselcellene som ble utviklet. De benytter en alkalisk elektrolytt som kaliumhydroksid i vann og drives av rent hydrogen. De ble benyttet i NASA-romfartøy for å produsere både elektrisitet og vann om bord på romfartøy.

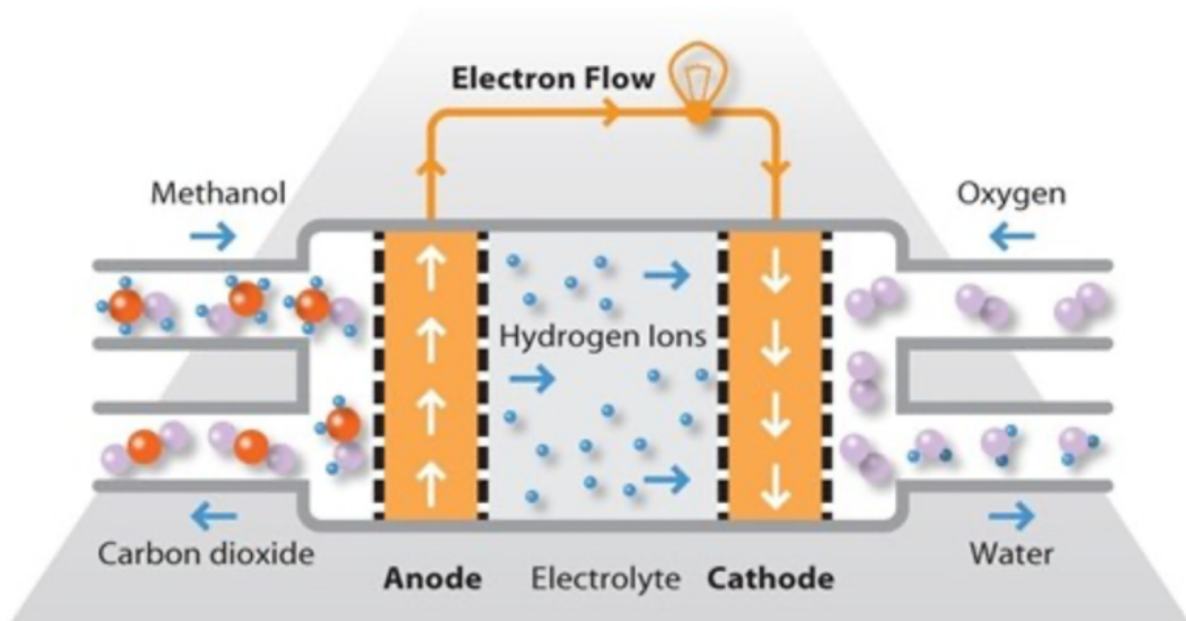


Figur 4.4: Den kjemiske reaksjonen i en alkalisk brenselcelle [41]

Direkte metanol brenselcelle (Direct Methanol Fuel Cells, DMFC) [40]

Direkte metanol brenselcelle er en brenselcelle utviklet på 1990-tallet og har i likhet med PEM-brenselcellen beskrevet i 4.1.3 en polymermembran. DMFC-anoden (den positive elektroden), har en platina-rutenium-katalysator på anode-siden som muliggjør det å ta ut hydrogen direkte fra flytende metanol, og eliminerer dermed behovet for en drivstoffreformer. Det er flere fordeler med metanol som trekkes frem, blant annet at den ikke er dyr, har en relativt høy energitetthet og enkelt kan transporteres og lagres.

Prinsippene og reaksjonene i en direkte metanol brenselcelle vises i figuren nedenfor.



Figur 4.5: Prinsippføring over reaksjonen i en DMFC [40]

I tillegg til PEM-brenselcellen gjort rede for i kapittel 4.1.3, samt en presentasjon av alkalisk og direkte metanol brenselcelle ovenfor, nevnes også brenselcellene listet nedenfor i rekken av brenselcelletyper:

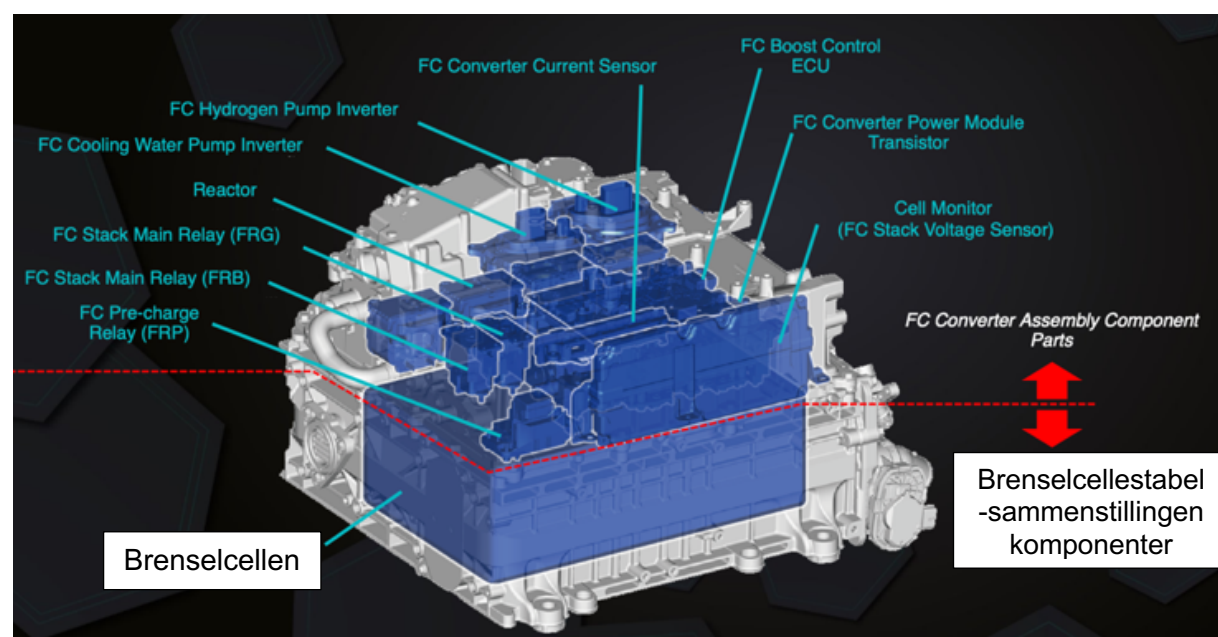
- Fastoksid-brenselcelle (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC)
- Fosforsyre-brenselcelle (Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC)
- Smeltekarbonat-brenselcelle (Molten Carbonate Fuel Cells, MCFC)

4.1.5. Sentrale komponenter i en brenselcellebil

Hensikten med dette kapitlet er å få overblikk og forståelse over noen av de mest sentrale komponentene i en brenselcellebil med utgangspunkt i Mirai 2. Det å forstå hvordan disse komponentene opererer både individuelt og med hverandre, vil være nødvendig for å forstå hvordan brenselcelle-elektriske biler fungerer. Komponenter som betraktes som drivverkskomponenter vil redegjøres for i kapittel 4.4.2.

1. Brenselcellestabel-sammenstillingen (FC Stack Assembly)

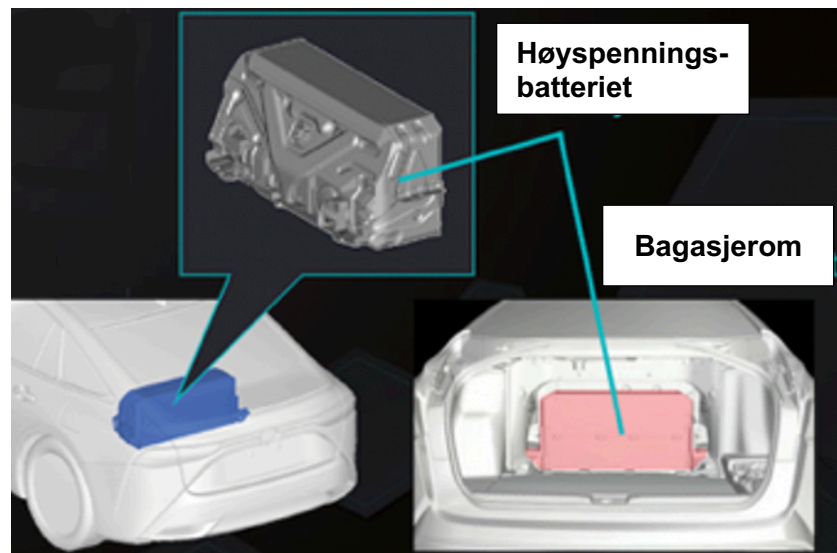
Figuren under illustrerer brenselcellestabel-sammenstillingen (Fuel Cell Stack Assembly).. Selve brenselcelle-enheten ligger i bunn under den røde stiplede linjen og det er denne enheten som er relevant for oppgaven. Brenselcellestabel-sammenstillingen har som oppgave å generere elektrisk energi basert på forespørsler fra Elektrisk Kjøretøy kontrollstyreenheten, som forklares senere i dette delkapitlet. Videre styrer Brenselcellestabel-sammenstillingen på en optimal måte mengden hydrogen og luft som skal inntas [13].



Figur 4.6: Brenselcellestabel-sammenstillingen [3].

2. Høyspenningsbatteriet (High Voltage Battery, HV Battery)

I begge generasjonene til Toyota Mirai ligger høyspenningsbatteriet plassert bak ryggsetene til passasjeretene bak, noe som gjør at seteryggen i Mirai til setene bak ikke kan tas ned slik man vanligvis kan gjøre hos andre biltyper, for eksempel i forbindelse med flytting av lange møbler. Høyspenningsbatteriet i Mirai 1 er laget av Nikkel-metallhydrid (NiMH) 244,8 V, mens i den nye Mirai 2 er det laget av Litium-ion batterier 310,8V. Høyspenningsbatteriene har i begge generasjoner en vekt på mellom 40 og 50 kg [3].



Figur 4.7. Høyspenningsbatteriet og dets plassering [3]

3. Vekselretter- Med Omformerenhet (Inverter with converter assembly) [13]: er en av hovedkomponentene i Mirai og har som hovedoppgave å drive motoren og luftkompressoren. I begge generasjonene så ligger denne hovedkomponenten under panseret, dog noe ulikt plassert [1].

Vekselretter- Med Omformerenhet (VMO) kan sees på som hovedkomponent bestående av viktige delkomponenter. Hovedsakelig består denne hovedkomponenten av:

- **3.1. Vekselretter (inverter)** – en vekselretter konverterer likestrøm (DC) til vekselstrøm (AC) [53]. Vekselretteren konverterer likestrømmen (DC) fra høyspenningsbatteriene, til 3-fase vekselstrøm som igjen driver luftkompressoren og den elektriske motoren som driver bilen [13]
- **3.2. Omformer (converter)** – Omformeren øker DC-spenningen fra høyspenningsbatteriet fra 310,8 V til maksimalt (DC) 650 V. Årsaken til at en ønsker å oppjustere spenningen er for å drive luftkompressoren og den elektriske motoren på et høyt spenningsnivå noe som bidrar til høyere effekt ut, samt en reduksjon i elektriske tap. Omformerens oppgave kan også nedjustere spenningen fra brenselcellen, samt vekselretteren [13].
- **3.3. Likestrøm/likestrøm-omformer (DC/DC converter)** – oppgaven til denne komponenten er å nedjustere spenningen fra høyspenningsbatteriene fra 310,8 V ned til 14 V, som i sin tur skal kunne drive diverse elektriske komponenter i bilen.



- **3.4. Motorstyringsenhet (MG ECU)** – Kan forstås som hjernen i VMO og styrer vekselretteren og omformereren.

Når det gjelder styring av vekselretteren, så styrer motorstyringsenheten:

1. Luftkompressoren basert på forespørsler i forhold til hvor mye luft brenselcellen krever.
2. Den elektriske motoren basert på forespørsler fra EK kontrollstyreenheten i forhold til dreiemomentet bilen ønsker basert på sjåførens kjørestil.
Den elektriske motoren – at den skal fungere som en generator ved regenerativ bremsing.

Når det gjelder styring av omformereren så er det altså motorstyringsenheten som regulerer styringen av denne komponenten som er beskrevet i punkt 3.2.

4. Motorstyringsenheter (Engine Control Unit, ECU) i Mirai 2 [13]

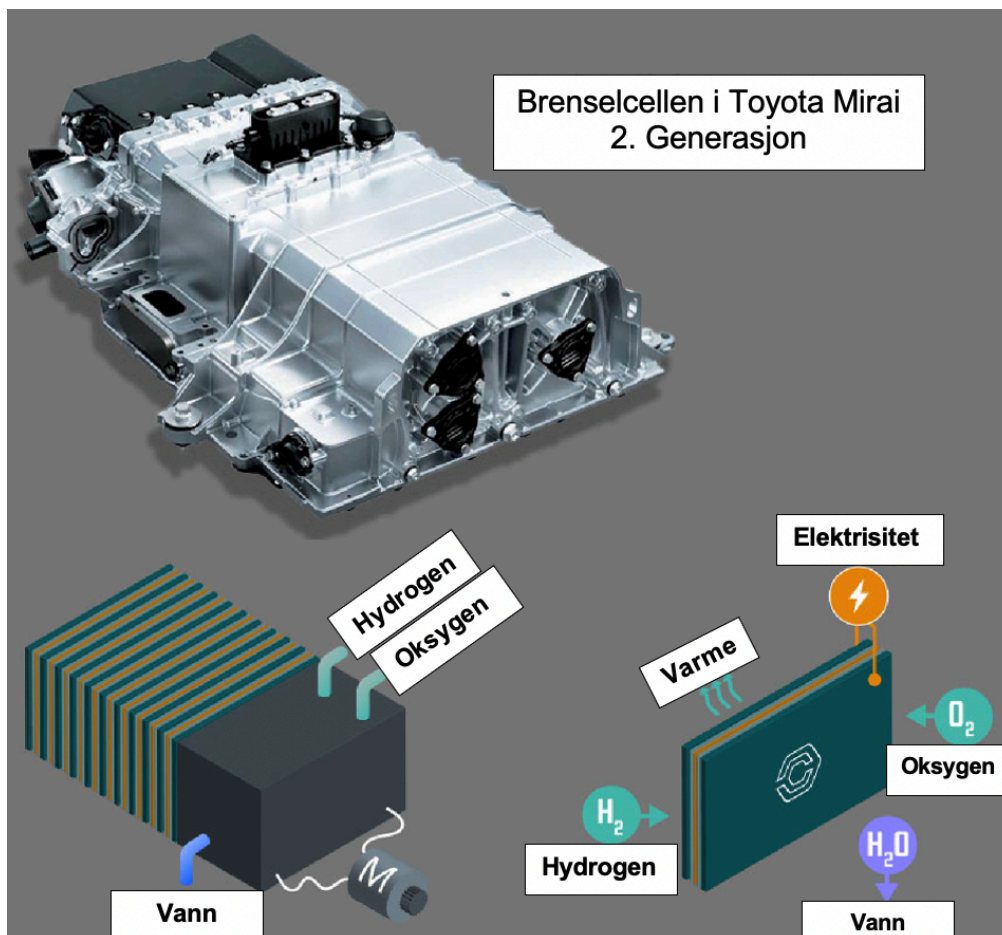
En motorstyreenhet kan forstås som en datamaskin som kontrollerer og styrer bilen gjennom data som registreres av diverse sensorer [54]. I Toyota Mirai finnes det flere motorstyringsenheter (eller bare: styringsenheter) som har hvert sitt ansvarsområde. De relevante hovedstyringsenhetene jeg trekker fram i denne oppgaven er:

- **4.1. Elektrisk Kjøretøy (EK) kontrollstyreenhet (Electrical Vehicle (EV) Control ECU)** – EK kontrollstyreenhet eller motorstyreenheten med hensyn på kontroll av den elektriske bilen har flere viktige oppgaver.
 - Den skal styre den elektriske distribusjonen i bilen, kontrollerer mengden hydrogen og oksygen som skal tilføres brenselcellen for å kontrollere mengden drivkraft/spenning som skal genereres i brenselcellen.
 - Den skal kommunisere med brenselcelle-kontrollstyringsenheten og motorstyringsenheten (MG ECU) ved å sende forespørsler i forhold til beregnet nødvendig mengde luft og hydrogen som kreves av luftkompressor og hydrogeninjektorene. På denne måten styrer EK kontrollstyreenheten den optimale mengden luft og hydrogen som tilføres brenselcellen.
 - Den skal regulere temperaturen til kjølevæsken til brenselcellen. Basert på temperaturen til denne kjølevæsken, skal EK kontrollstyringsenheten drive hastigheten kjølevæsken flyter samt kjølevifte-hastigheten.
 - Styrer likestrøm/likestrøm-omformereren og vannpumpa. Den overvåker og kontrollerer også høyspenningsbatteriets spenningstilstand, strømtilstand og temperatur.
- **4.2. Brenselcelle kontrollstyringsenhet (FC Control ECU)** – Hovedoppgaven er å styre hydrogeninjektorene og åpning/ stengning av ventilene basert på signaler den mottar fra EK kontrollstyreenheten.
- **4.3. Motorstyringsenhet (MG ECU):** Forklart under VMO.

5. Brenselcelle-økningssomformer (Fuel cell Boost converter): øker spenningen generert i brenselcellen til DC 650V [13]. Ligger under panseret i Mirai 2. Virkningsgraden er økt fra 97% til 98.5%. [1]

6. Brenselcellen (Fuel cell stack, FC Stack)

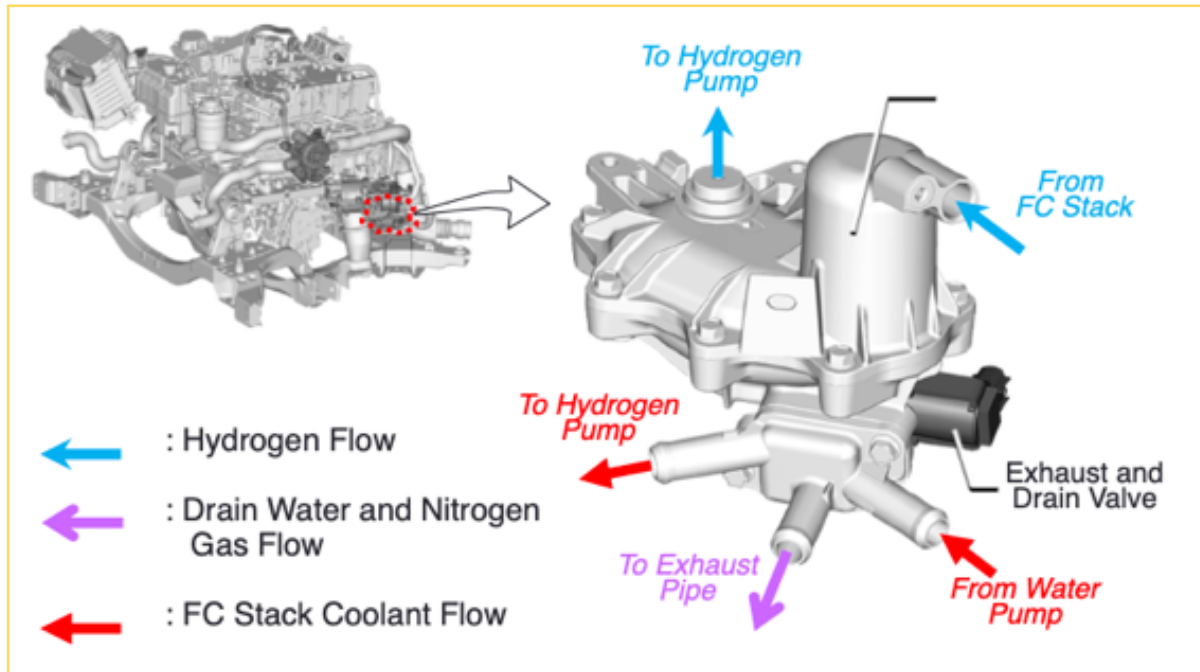
Brenselcellen er utredet tidligere, men kort beskrevet så skal brenselcellen generere elektrisk energi ved den kjemiske reaksjonen hvor hydrogengass injiseres fra hydrogentankene og oksygen inntas fra luftkompressoren [13]. Brenselcellen er en integrert hovedkomponent i brenselcellestabel sammenstillingen. FC Stack Assembly. Brenselcellen er i Mirai 1 plassert omtrent midt under passasjeretene, mens i Mirai 2 er den plassert under panseret. Den består av 330 celler i Mirai 2, sammenliknet med 370 celler i Mirai 1. Årsaken til dette er at brenselcellen har blitt utviklet og er nå størrelsesmessig mindre, lettere og har en høyere virkningsgrad [1]. Brenselcellen i Mirai 2 bestående av 330 celler er en integrert del av hovedkomponenten som på engelsk kalles Fuel Cell Stack Assembly og brenselcellen produserer 128 kW, hvilket er en oppgradering fra Mirai 1. generasjon som var på 114 kW.



Figur. 4.8. Illustrasjon av brenselcellen [55]

9. Gass-væske separator (Gass-liquid separator)

Gass-væske separatorens oppgave er å separere hydrogengass og væske (vann) før hydrogenet sendes tilbake for ombruk (ettersom all hydrogengass ikke klarer å bli utnyttet (brukt), så vil resthydrogengasset forsøkes å unyttes på nytt).



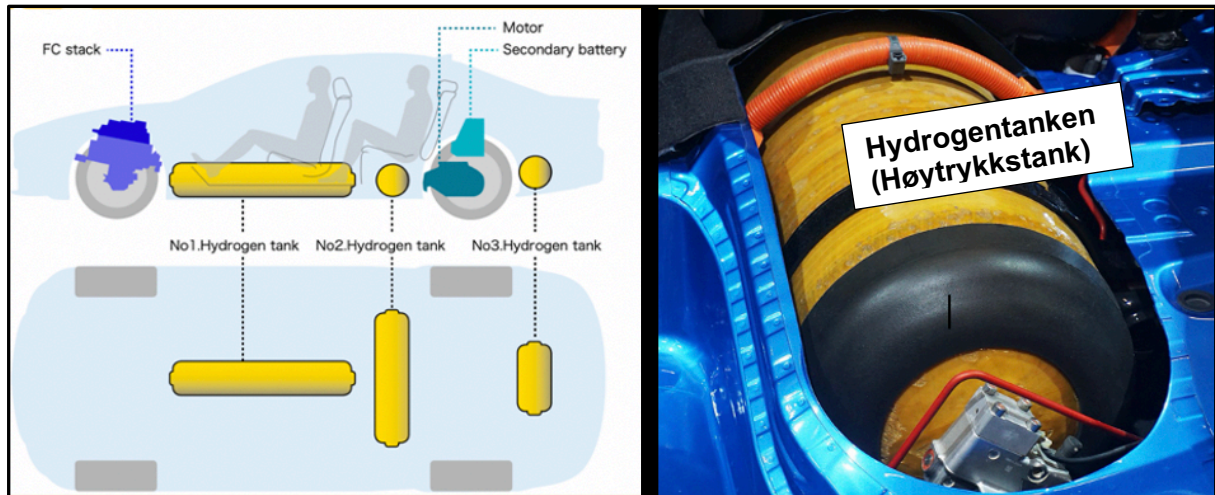
Figur 4.9: Gass-væske separator [12]

10. Luftkompressoren (Fuel Cell Air Compressor)

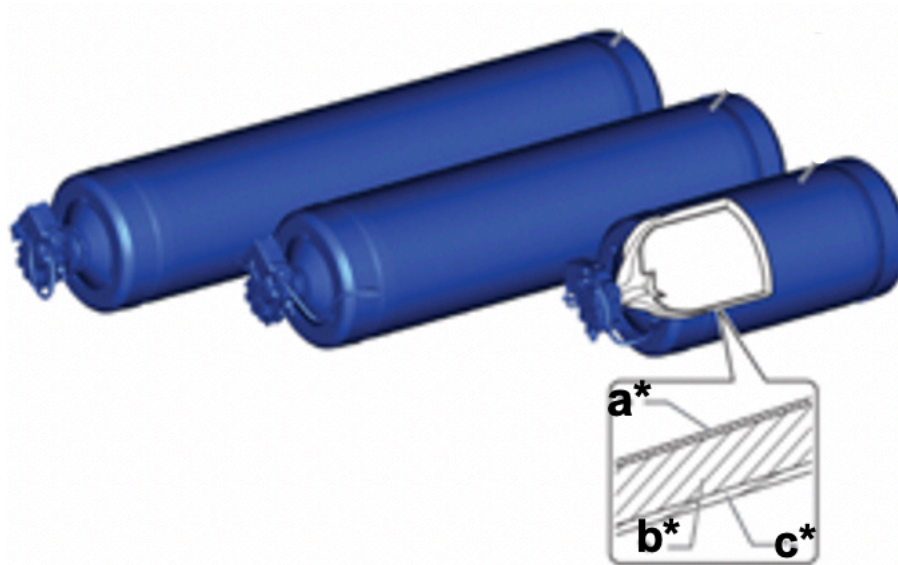
Luftkompressoren spiller en viktig rolle i generering av kraft i brenselcellen. Brenselcellen er helt avhengig av luft for å kunne virke, og hvor mye luft den har behov for avhenger blant annet av hastigheten og akselerasjonen til bilen. Eksempelvis krever brenselcellen et lavere luftinntak ved kjøring i lav konstant hastighet, mens ved akselerasjon opp i høy hastighet krever den et høyere luftinntak.

Hovedoppgaven til luftkompressoren er følgelig å komprimere luften fra atmosfæren og sende luften inn til brenselcellen. Hvor mye luft som blir komprimert avhenger av akselerasjonen, og følgelig kan en også si at hvor mye kraft/spenning som kan genereres i brenselcellen også er avhengig av hvor mye luft luftkompressoren er i stand til å komprimere. I Toyota Mirai 2 er luftkompressoren forbedret på mange områder, sammenliknet med luftkompressoren i Mirai 1. Dette har Toyota greid å få til på grunn av virkningsgraden med hensyn på hvor mye luft den kan komprimere som er forbedret med 24%, vekten er redusert med 35% og størrelsen er redusert med 45% [18].

11. Hydrogentanker: Hydrogentankenes oppgave er å lagre hydrogengassen, altså selve drivstoffet i brenselcellebilen. I den nye Mirai 2 er det tre hydrogentanker, sammenliknet med Mirai 1 som består av to hydrogentanker. Det maksimale trykket i hydrogentankene er 70 MPa [3], men hydrogentankene er konstruert og dimensjonert for å håndtere høyere trykk under fylling på 87.5 MPa [13]. På samme måte som bensin/diesel lagres i en drivstofftank i fossilbiler, lagres hydrogengass i disse spesialkonstruerte hydrogentankene i brenselcellebiler. Figuren under til venstre viser de tre hydrogentankene i Mirai 2 og hvordan de er posisjonert under bilen, og figuren under til høyre viser et virkelig bilde av hydrogentanken som brukes i Mirai 2.



Figur 4.10: Figur t.v. plasseringen av hydrogentankene i Mirai 2 [14] og figur t.h. bilde av hydrogentanken [47]



Figur 4.11. Tverrsnitt av lagene i hydrogentanken [13], materialnavn i tabellen under

Figuren over illustrerer hydrogentankene i Mirai 2 og viser materialene de ulike lagene er laget av. Det forstørrede området viser et tverrsnitt av lagene i hydrogentanken. Hvert lag er laget av nøye utvalgte materialer. I tabell 4.3 beskrives disse tre ulike materialene brukt i de ulike lagene i hydrogentanken.

Tabellen under beskrives materialene de ulike lagene i hydrogentankene er laget av.

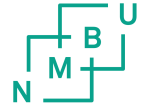
Tabell 4.3: Hydrogentankens material- og funksjonsbeskrivelse [13]

Materialnavn + posisjon i forhold til figur 4.11	Posisjon	Funksjon
Plastforing (Plastic Liner) Posisjon/referanse: (*a)	Innerst	<ul style="list-style-type: none"> - Forhindrer gjennomtrenging av hydrogengass - Sikrer lufttett hydrogengassforsegling [19]
Karbonfiberforsterket plast (Carbon Fiber Reinforced Plastic Layer) Posisjon/referanse: (*b)	Midt	<ul style="list-style-type: none"> - Forsterker plastforingen - Styrker hydrogentankene
Glassfiberforsterket plast-lag (Glass Fiber Reinforced Plastic Layer) Posisjon/referanse: (*c)	Ytterst	<ul style="list-style-type: none"> - Beskytter overflatelaget

4.1.6. Fordeler og ulemper

Fordeler med hydrogenbiler og brenselcelleteknologi

- I tradisjonelle personbiler med forbrenningsmotor med bensin eller diesel som drivstoff er en fordel med disse kjøretøyene tiden det tar å fylle drivstoff, som erfaringsvis er på noen få minutter. En fordel med brenselcellebiler som har hydrogengass som drivstoff, er at det tar cirka like lang tid å fylle drivstoff (hydrogengass), sammenliknet med tiden det tar å fylle bensin/diesel. Ifølge Toyota tar det cirka tre minutter å fylle tanken til Toyota Mirai [13]. Dette sammenliknet med El-biler, vil kunne gjøre brenselcellebiler mer attraktive fra et forbruker-perspektiv. Dette er særlig en stor fordel sammenliknet med hel-elektriske kjøretøy, hvor det selv med hurtigladestasjonene til Tesla, vil ta cirka 15 minutter å lade Teslaen opp til å kunne kjøre litt over 300 km [45].
- En annen fordel med brenselcellebiler er knyttet til rekkevidden de kan kjøre på full hydrogentank. Hvis en legger til grunn at virkningsgraden for hvor effektivt hydrogenet blir utnyttet i brenselcellen er den samme, så vil muligheter for å doble kjøreavstanden i brenselcellebiler, enten være å ha hydrogentanker med dobbelt så stort volum, eller sette inn dobbelt så mange hydrogentanker.
Sammenlikner man dette med hel-elektriske kjøretøy, så må man for å doble rekkevidden enten ha batteripakker med dobbelt så høy energitetthet eller så må antallet batterier doubles. Slik jeg tolker det vil det sistnevnte alternativet per dags dato, på grunn av batteribegrensninger, være det realistiske alternativet. En dobling i antall batterier vil også resultere i en bil som er vesentlig tyngre og større.
Et eksempel for å kvantifisere dette er batteripakken til Tesla modell S som har en masse på 540 kg [46]. En dobling av batteripakkene fører til en økning i vekt på 540 kg, altså i overkant av et halvt tonn, mens hydrogentankene til Mirai 1 veier i underkant av 100 kg og ville ved en fordobling av antall hydrogentanker ført til en økning i vekt på 100 kg. Altså under en femtedel av vektøkningen sammenliknet med eksempelet over med Teslaen.
- Et av kjennetegnene ved brenselcellen er dens høye virkningsgrad ettersom elektrisiteten som genereres kan direkte tas fra brenselcellen uten å motta forbrenne hydrogenet for å utnytte det [13]. Virkningsgraden for en hydrogendreven brenselcelle er på 40-45 prosent, for eksempel til sammenlikning med en dieselmotor som har en virkningsgrad på 20-25 prosent [71].
- Når hydrogen er brenselet som benyttes i en brenselcelle, vil det eneste avfallsproduktet være vann, altså vil ingen forurensning eller drivhusgasser produseres.
- På tungtransportsiden så lages det lastebiler med el-drift og det kan oppleves som at det er store utfordringer når det gjelder rekkevidde [35]. Dette er en kjøretøygruppe som vil kunne oppleve stor glede av brenselceller ettersom det ikke vil være plassproblematikk når det gjelder hydrogentankene, samt at hydrogentanker sammenliknet med store batteripakkene i elbiler, er relativt lette.



- En fordel med å bruke hydrogen er at det skapes elektrisitet mens man kjører hydrogenbilen og at ved miljøvennlig hydrogenproduksjon, så er det ikke behov for utbygging av kjernekraftverk. En utfordring og en mulig ulempe med EI-biler er henholdsvis at den må lades, samt at strømmen må være laget en plass. Dersom dette skal være miljøvennlig, så er en god løsning at strømmen produseres ved hjelp fornybare kilder. I den vestlige verden kan det erfares at kjernekraft er på sterk retur [60].

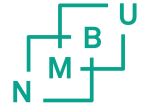
TU.no skriver om konsekvensene ved atomkraftverk og nevner blant annet Tsjernobyl-ulykken i 1986 som innebar omtrent 400 dødsfall som følge av kreft i Norge og at «dersom vi ser på alle kjeder i produksjonen av atomenergi, er den slettes ikke utslippsfri. Svært mye utslipp er knyttet til etableringen av anleggene. Å bygge ny atomenergi vil fram til 2030 bety en formidabel utslippsøkning. Å satse på fornybare energikilder er tryggere, renere, billigere og raskere» [60].

Ulemper med hydrogenbiler og brenselceller

- Svært begrenset infrastruktur for hydrogengass-fylling, kun et fåtall hydrogenstasjoner i Norge
- Hydrogenbiler er i utgangspunktet lydløse (ingen motor som lager lyd slik man er vant til når det gjelder biler med forbrenningsmotor) og vil kunne skape farlige situasjoner i trafikken.
- Hydrogenbiler er dyre biler og prisen på Toyota Mirai og Hyundai Nexo ligger på mellom 500 000 [58] og 600 000 kr [57]. Altså vil det vanligvis være utenkelig at ungdom og andre med relativt lave lønninger vil kunne ha råd til slike biler.
- Hydrogenproduksjonen (drivstoffet/brenselet i brenselcellen) kan produseres av kull eller metan som igjen kan bidra til utslipp av for eksempel karbondioksid [49].

4.1.7. Status, videreutvikling og forventninger fra produsentsiden

- Etter lange samtaler med Toyota Norge representert ved teknisk instruktør Terje Wiltihl [35] den 8. april 2022, framkommer det at hydrogen har et ufortjent dårlig rykte på seg og at hydrogeneksplosjonen i Sandvika i 2019 (beskrevet i kapittel 4.3) er hendelser som er med på at investorer og andre sentrale aktører for utvikling av Hydrogen, trekker seg eller sakner utviklingen av hydrogenbiler i betydelig grad. Dersom hydrogenbiler skal ha en sjanse til å etableres i samfunnet og utgjøre en miljøforskjell, så er Toyota og Hyundai, som leverandører av hydrogenbiler, nødt til å ha med seg støttespillere samt statlig støtte for tilrettelegging for denne typen teknologi. Dette blant annet gjennom utbygging av infrastruktur for hydrogenstasjoner, som sannsynligvis vil være svært viktig for mange forbrukere.
- Et annet punkt som ble diskutert på møtet med Terje Wiltihl var at årsaken til at det kun er mulig å lease Toyota Mirai, og ikke kjøpe bilen, er fordi Toyota ønsker å ha



muligheten til å trekke tilbake bilen dersom det skulle skje noe uforventet. Dette er fordi Mirai fortsatt er en relativt ny bil og hydrogenbiler er relativt nytt i bilmarkedet. Følgelig ønsker Toyota å ha muligheten til å trekke tilbake bilen dersom det skulle oppstå uforventet problematikk. Dette er også et tema som Motor.no tar opp hvor de skriver at Toyota ikke ønsker at du skal kjøpe Mirai ettersom det er mange ukjente faktorer rundt eierskap av hydrogenbiler, noe som har medført at Toyota vil ha all handel på leasing. Dette skriver de også sannsynligvis er til det beste for begge parter [43].

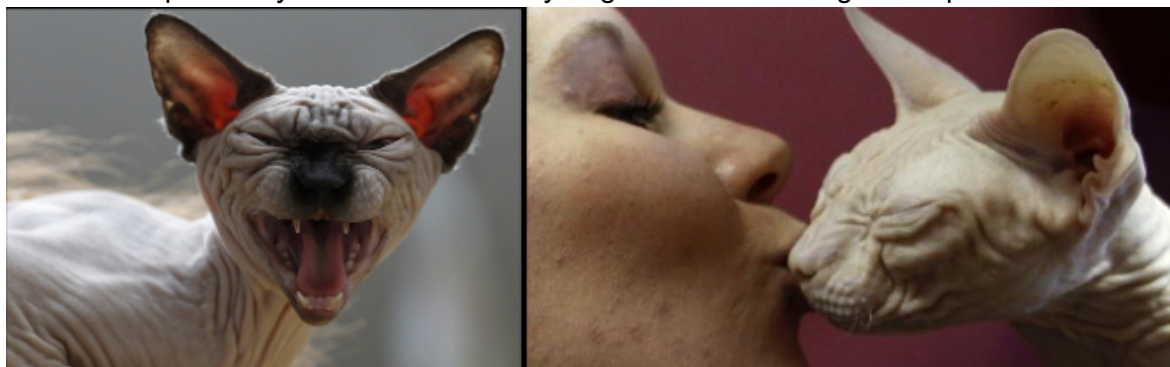
- Terje Wiltihl beskriver også at hydrogenbiler vil være mest aktuelt inn mot tungtransporten ettersom det av størrelsesmessige hensyn er uproblematisk å sette inn ekstra hydrogentanker for ekstra rekkevidde. Samtidig så vil lastebiler spare mye tid på å være hydrogenbaserte framfor å ha batteripakker som må lades opp. For særlig tungtransporten så vil hel-elektriske lastebiler utgjøre svært mye vekt og plass. Dette er noe som vil være ugunstig, sammenliknet med det å benytte brenselcelleteknologi hvor man kan sette inn ekstra hydrogentanker for økt lagringskapasitet av hydrogengass og dermed økt rekkevidde [35].

4.2. Hydrogen som drivstoff

Hensikten med å gjøre en utredning av hydrogen er fordi det vil være et viktig grunnlag å ha kunnskaper om hydrogen, for å kunne forstå de sikkerhetsmessige vurderingene og prinsippene som gjelder i kjøretøy som benytter hydrogenteknologi. I tillegg til dette så er det ønskelig å undersøke om hydrogen faktisk kan være med på å redusere eksempelvis CO₂-utslipp og bidra positivt med hensyn på miljø og bærekraft.

4.2.1. Bakgrunn

En viktig bakgrunn for utredning av hydrogen er skepsisen folk kan ha blant annet på grunn av den potensielle faren for brann og eksplosjon ved bruk av hydrogenteknologi. Toyota illustrerer skepsisen/frykten rundt bruk av hydrogen med bildene og eksempelet forklart under.



Figur 4.12: Bilder av den hårløse Sphinx-katten [20]

Eksempelet til Toyota som har som hensikt å ufarliggjøre hydrogen [20] er at ved første øyekast kan katten i figuren over t.v. virke skummel og fryktinngytende, men dersom man har kunnskaper om katten, dens atferd og egenskaper, så vet man at Sphinx-katten er en veldig kjærlig katt, noe bildet over t.h. illustrerer. Toyota påpeker videre at kunnskaper om hydrogen er viktig for ens sikkerhet og at på samme måte som i tilfellet med Sphinx-katten, så er ikke hydrogen så farlig som mange kan tro. Et annet poeng er at bensinbiler også innebærer muligheten til både brann og eksplosjon.

4.2.2. Hydrogenproduksjon

Hydrogen er det vanligste grunnstoffet i hele universet. Her på jorden finnes det også rikelig med hydrogen, men det aller meste er bundet til oksygen i vann [63]. Det vil si at hydrogen ikke er like vanlig eller tilgjengelig i isolert form. Til tross for at hydrogenteknologi kan være en viktig bidragsyter for å skape et bærekraftig samfunn, og til tross for at hydrogenbiler er definert som nullutslipps-kjøretøy, så er et viktig poeng at produksjonsmetoden for å lage rent hydrogengass ikke nødvendigvis er miljøvennlig eller bærekraftig. I dette delkapittelet presenteres ulike hydrogenproduksjonsmetoder som kategoriserer i et fargespekter, hvor blått er det mest miljøvennlige.

I World Economic Forum ble det den 21 desember 2021 publisert en artikkel som, oversatt til norsk, heter: «Hva er grønt hydrogen og hvorfor trenger vi det? En ekspert forklarer» [49]. Eksperten er Emanuele Taibi og har bakgrunn som leder i Power Sector Transformation Strategies for International Renewable Energy Agency. I artikkelen framkommer det at det er en enestående fart rundt om i verden for å oppfylle hydrogenets potensial som en ren

energiløsning. Videre blir det skrevet om FNs klimakonferanse, COP26, hvor grønt hydrogen blir omtalt som et middel for dekarbonisering av tungindustri, langdistansefrakt, skipsfart og luftfart.

Ifølge Taibi vil hydrogen, uavhengig av hydrogenproduksjonen, ende opp i et karbonfritt molekyl, men at for å produsere hydrogenet i sin rene form så er det forskjellige produksjonsmetoder som kan innebære forskjellige utslipp av klimagasser som karbondioksid (CO₂) og metan (CH₄). Taibi forklarer de forskjellige produksjonsmetodene i «fargespekteret» [49]:

- **Grønt hydrogen (Green)** er definert som hydrogen produsert ved spalting av vann (H₂O) til hydrogen og oksygen ved bruk av fornybar energi, altså elektrisitet dannet ved fornybare kilder, som for eksempel solceller og vindkraft.
- **Grått Hydrogen (Grey)** er vanligvis produsert fra metan (CH₄), som spaltes med damp til CO₂ og H₂. Prosessen kalles også dampreforming (Steam reforming). Grått hydrogen har også i økende grad blitt produsert fra kull, hvilket gir såpass høyere grad av CO₂-utslipp at denne produksjonsmetoden av hydrogen er blitt kalt brunt eller svart hydrogen.
- **Blått hydrogen (Blue)** følger også den samme produksjonsprosessen som ved grått hydrogen, men det nye er at det benyttes teknologi som kan fange karbondioksidet som produseres, samt at en kan lagre karbondioksidet i lang tid. Taibi trekker likevel fram at ikke 100 prosent av karbondioksidet fanges og heller ikke alle måtene for å lagre karbondioksidet er like effektive.
- **Turkist hydrogen (Turquoise)** refererer til metoder som pyrolyse av metan hvor man kan fange 90-95 prosent av karbondioksidet som produseres fra metan. Det kan også lagres karbondioksid i fast form på en så god måte at begrepet turkist hydrogen har oppstått.

Figuren nedenfor viser prosessen (process) og kilden (source) som hhv. forklarer prosessen altså hvordan hydrogenet fremstilles, og ved hjelp av hvilke kilder de produseres. Dette med hensyn på fargespekteret.

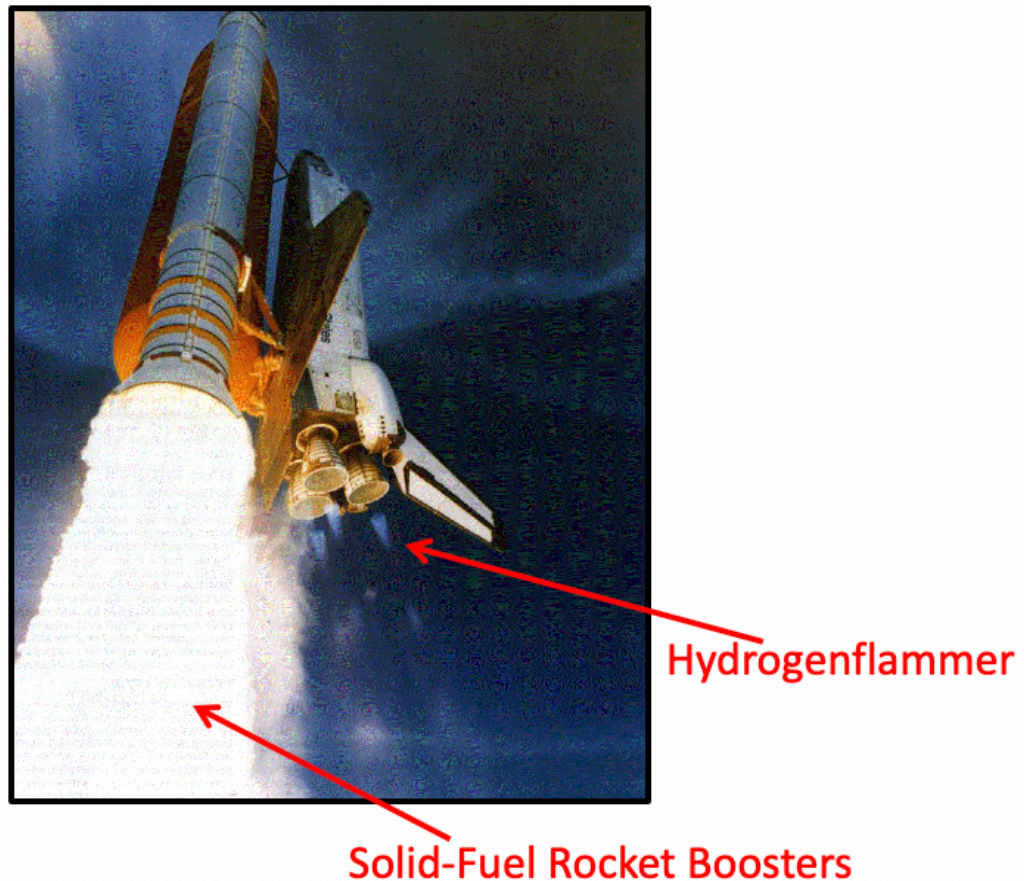
Color	GREY HYDROGEN	BLUE HYDROGEN	TURQUOISE HYDROGEN*	GREEN HYDROGEN
Process	SMR or gasification	SMR or gasification with carbon capture (85-95%)	Pyrolysis	Electrolysis
Source	Methane or coal 	Methane or coal 	Methane 	Renewable electricity

*Note: SMR = steam methane reforming.
* Turquoise hydrogen is an emerging decarbonisation option.*

Figur 4.13. Hydrogenproduksjonsmetoder presentert som fargeskala [49]

4.2.3. Egenskaper

Hydrogen er det første elementet i periodesystemet, og er i gassform fargeløs og luktfri. Derfor kan ikke hydrogengass bli oppdaget verken gjennom syns- eller luktesansen [3]. Derfor er det av sikkerhetsmessige årsaker svært viktig at kjøretøy utstyres med hydrogensensorer/ hydrogendetektorer som kan oppdage og varsle om eventuelle lekkasjer. Dette gjøres rede for ytterligere i kapittel 4.3.

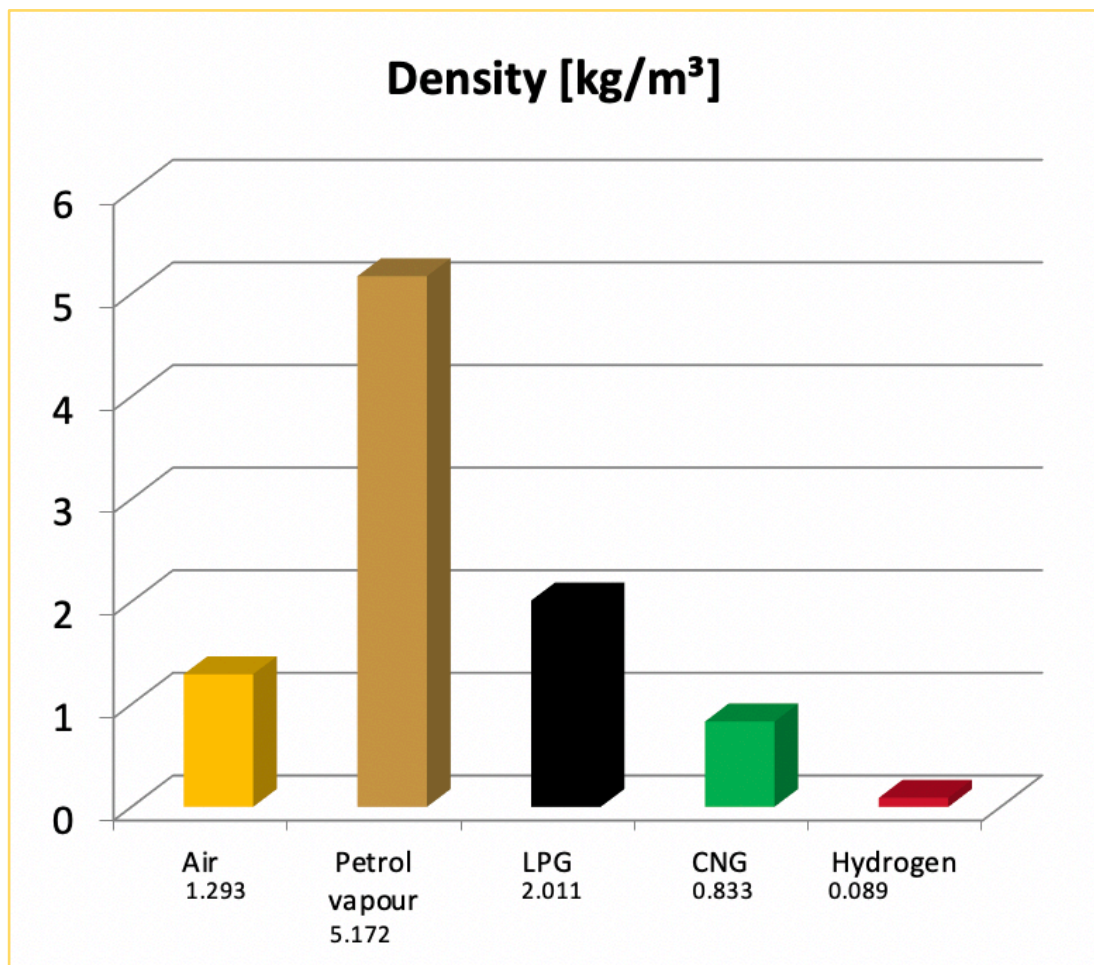


Figur 4.14: Oppskytningsrakett [72]

Figur 4.14 over viser en oppskytningsrakett hvor hydrogenflammene vanligvis ikke kan oppdages av synet, sammenliknet med røyken av drivstoffet (solid fuel) som er tydelig synlig ved oppskyting av slike raketter.

Egenskaper knyttet til tetthet

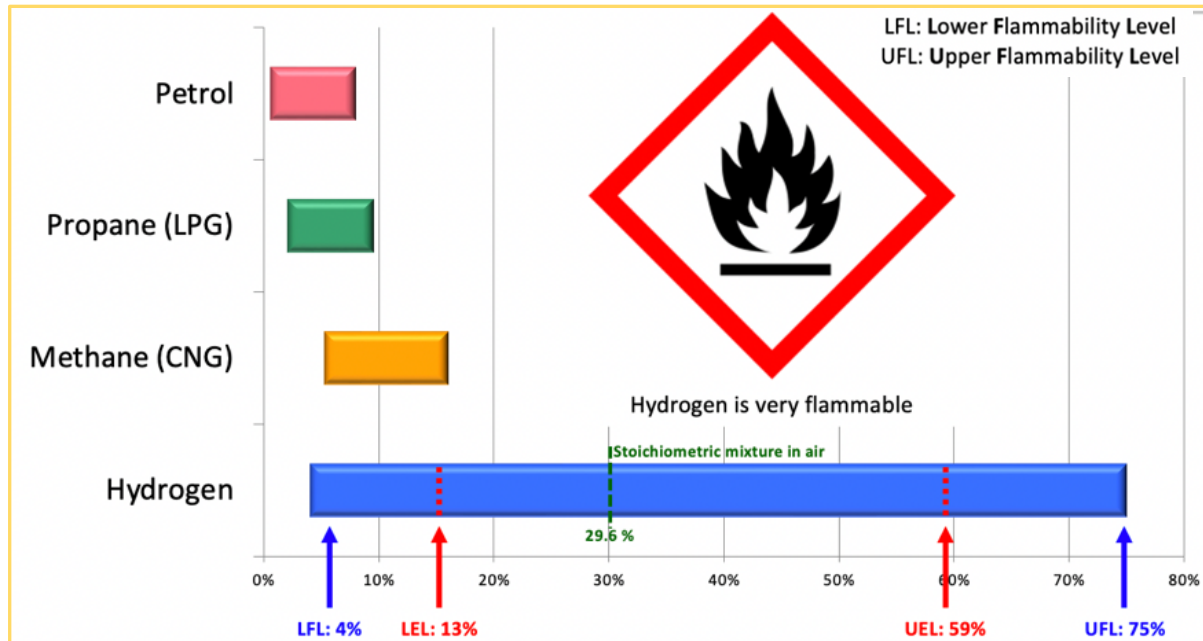
Figur 4.15 viser en oversikt over tettheten til et utvalg gasser og viser at hydrogen er mellom 14 og 15 ganger lettere enn luft. Luft består av gassene i jordas atmosfære og består hovedsakelig av nitrogen (ca. 78%) og oksygen (ca. 21%) [64]. En gass som lekker ut i et lukket rom vil «stige eller synke», avhengig av gassens tetthet i forhold til luften [21]. Dette vil si at gasser lettere enn luft vil stige, mens en gass som er tyngre enn luft, vil synke. Dette er sentralt fordi atmosfæren vår er fylt med luft og ettersom hydrogen er 14-15 ganger lettere enn luft så vil den ha en høy hastighet oppover dersom hydrogengass lekkes. Hydrogen har en hastighet på 20 m/s (72 km/t) retning oppover [3], noe som er et viktig poeng senere i forbindelse med hydrogensikkerhet.



Figur 4.15: Tettheten til et utvalg av stoffer i gassform [20].

Egenskaper ved ulike konsentrasjonsgrenser

LFL og UFL i figur 4.16 under står for henholdsvis nedre brennbarhetsgrense/antennelighet (4%) og øvre brennbarhetsgrense/antennelighet (75%) og indikerer at hydrogen brenner i et konsentrasjonsintervall mellom 4 og 75 prosent. LEL og UEL står, oversatt til norsk, for henholdsvis nedre eksplosivitetsgrense og øvre eksplosivitetsgrense og indikerer at hydrogen kan eksplodere i et konsentrasjonsintervall mellom 13 og 59 prosent. Av figuren under ser vi at hydrogen er svært brennbart, noe som medfører at det naturligvis reises sikkerhetsrelaterede spørsmål.



Figur 4.16: hydrogenegenskaper ved diverse konsentrasjoner. Prosenten (%) angir volumandelen [20].

Antennelighet

Figuren nedenfor viser en tabelloversikt over noen drivstofftyper og deres minste/minimum tenningsenergi. MIE er et mål på den laveste mengden energi som overføres av en elektrisk gnist som vil antenne et spredt drivstoff eller på annen måte brennbar forbindelse i luften» [22].

Tabell 4.4: Tabell oversikt over typer brensel og deres minste tenningsenergi [20].

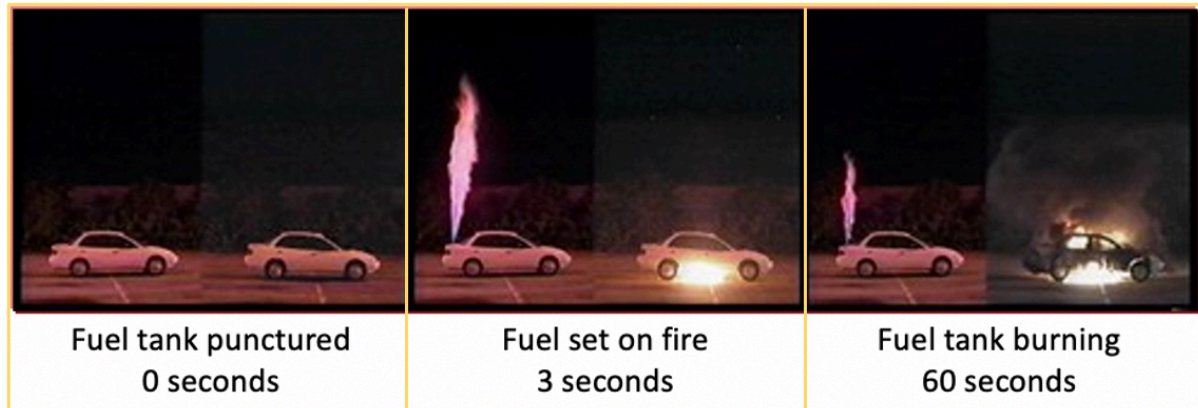
Brensel (Fuel type)	Minste tenningsenergi [mJ] (Minimum Ignition Energy (MIE))
Bensin (Gasoline)	0,24 – 2,00
Propan (Propane, (LPG))	0,25
Metan (Methane (CNG))	0,21
Hydrogen	0,017

Av tabellen over kan vi tolke at bensin, propan og metan har en minimums tenningsenergi som er mer enn 10 ganger så høy som hydrogen. For å få en forståelse for hvor lite energi dette tilsvarer, kan man se for seg et støt man får grunnet statisk elektrisitet. Et merkbart støt opplever du i et støt fra og med cirka 1 mJ, og et ukomfortabelt støt opplever man ved cirka 50 mJ. Denne kunnskapen gir forståelse for hvor lite tenningsenergi som skal til for at hydrogen skal antennes [20].

Spredningsevne og varmestråling [20]

Hydrogengass har en spredningsevne på $0,63 \text{ cm}^3/\text{s}$, som innebærer at hydrogengass sprer seg raskere enn noe annet drivstoff [20]. Hydrogengass sprer seg altså raskt og som tidligere skrevet oppover med en hastighet 20 m/s, samt bort fra kilde hvor det forekommer hydrogenlekkasje. Bensin derimot, vil ved en bensinlekkasje ikke bevege seg nevneverdig bort fra kilden hvor lekkasjen har skjedd. Ved bensinbranner vil det være relativt veldig høy varmestråling, sammenliknet med hydrogen som har lav varmestråling, hvilket betyr at varmen typisk ikke sprer seg. Dette medfører at det kan være trygt å holde noen meters avstand (ikke at det i praksis anbefales), mens ved en bensinbrann så vil varmen spre seg på grunn av høy varmestråling.

Dr. Michael Swains bilbranneksperiment grunnet hydrogen- og bensinlekkasje [23]



Figur 4.17: bilbranneksperiment med hydrogen og bensin som drivstoff [23]

Dr. Michael Swain ved Universitetet i Miami utførte i 2001 et eksperiment for å illustrere hva som ville skje ved to bilbranner forårsaket av punktering i en bensinledning. Figur 4.17. er delt inn i tre ruter, hvor bilen som er står til venstre i rutene er hydrogenbil, og bilene til høyre i rutene er bensinbiler. Bildene viser at brannen forårsaket av hydrogenlekkasjen går rett opp til himmels og at når hydrogengassen tømmes så vil så vil flammene fra hydrogenbrannen bli mindre. I tilfellet med bensinlekkasjen så ender hele bilen opp med å brenne, og etter 60 sekunder så er det liten tvil om at bensinlekkasjen har medført de mest alvorlige konsekvensene for både bil og eventuelle passasjerer i bensinbilen.

På bakgrunn av eksperimentet vil en tilsynelatende kanskje tenke at hydrogengass som drivstoff i biler gir større trygghet sammenliknet med bensinbiler med forbrenningsmotor. Dette eksperimentet kan dog kritiseres for at hydrogenlekkasjen skjer på et svært gunstig, og man kan stille spørsmålet om hvordan hydrogenbrannen hadde utviklet seg dersom hydrogenlekkasjen hadde oppstått under bilen. Eksperimentet kan også kritiseres for at hydrogenlekkasjen skjer på en kontrollert måte ved at hydrogenlekkasjen skjer på et gunstig sted hvor flammene kan gå rett til himmels, mens i tilfellet med bensinbilen så skjer brannen ukontrollert, også som en konsekvens av at bensinlekkasjen skjer under bilen. Videre vil jeg påstå at en vurdering på bakgrunn av eksperimentet er at bensinbilen i hvert fall ikke nødvendigvis er noe tryggere enn hydrogenbilen.

4.3. Sikkerhetsmessige prinsipper i hydrogenbiler

Hensikten med dette kapittelet er å kartlegge de sikkerhetsmessige vurderingene som er gjort i hydrogenbiler, med utgangspunkt i Toyota Mirai. Dette vil være viktig for eventuelt å kunne ha en kunnskapsbase som kan bidra til å kunne argumentere for at hydrogenbiler er relativt trygge biler hvor sikkerhet ivaretas.

4.3.1. Bakgrunn

Det å benytte biler med hydrogen er det første forsøket på å bruke energien i hydrogen i storskala. Dette har medført at en rekke sikkerhetsrelaterte spørsmål har oppstått både blant offentlige myndigheter og eksempelvis brannvesen og forsikringsselskaper. Dette kan tolkes som at det eksisterer en skepsis rundt hvor trygge brenselcellebiler egentlig er, og derfor vil dette kapittelet gjøre rede for sikkerhetsrelaterte aspekter ved brenselcellebiler, for å forsøke og gi et svar på om det er grunn til å være skeptisk eller om det er relativt trygt å ta i bruk kjøretøy med brenselceller. Dette sammenliknet med biler med forbrenningsmotor og bensin/diesel som drivstoff.

Hydrogeneksplosjon UNO-X Sandvika

Den 10. juni 2019 eksploderte hydrogenstasjonen på Kjærbo i Bærum, Sandvika. Uno-X hadde tre hydrogenstasjoner som ble stengt som konsekvens av denne eksplosjonen. I utgangspunkt var det ingenting som skulle tilsi at det skulle skje en eksplosjon på denne hydrogenstasjonen. Konsulentselskapet Gexcon fikk ansvar for utredning og undersøkelse og det ble avdekket og konkludert at eksplosjonen skyldtes en monteringsfeil hvor to bolter ble skrudd til for svakt [65]. Det er med andre ord menneskelige feil som førte til denne ulykken. I etterkant av slike ulykker, kanskje spesielt med tanke på at det var en eksplosjonsulykke, kan det tenkes at man blir mer skeptiske til hydrogenteknologi når en leser slike nyhetssaker.



Figur 4.18: Uno-X hydrogenstasjonen i Sandvika kort tid etter eksplosjonen [50]

4.3.2. Fire sikkerhetsprinsipper i hydrogenbiler

Brenselcellebiler har blitt utviklet basert på fire sikkerhetsprinsipper som skal sørge for at de er like trygge som for eksempel tradisjonelle bensinbiler [70]. Disse sikkerhetsprinsippene er også gjeldende for andre brenselcellebiler [35].

Grunnleggende sikkerhetsprinsipper for hydrogenkomponenter [13]:

1. Unngå lekkasje av hydrogengass:

For å unngå lekkasje er det to hovedprinsipper som gjelder:

1. Delene som forbinder hydrogenslangene designes med høyt fokus på lekkasjeforebygging.
2. Det velges materialer for å unngå fenomenet hydrogensprøhet, som «er et fenomen som opptrer i metaller når de utsettes for hydrogen og mekanisk spenning» [66].

2. Oppdage og stanse lekkasjer med hydrogendetektorer:

Ettersom hydrogenlekkasje kan utgjøre en sikkerhetsrisiko, er brenselcellebiler med hydrogen som drivstoff utstyrt med hydrogendetektorer og kollisjonssensorer, henholdsvis fordi:

1. I det usannsynlige scenariet hvor hydrogengasslekkasje skulle forekomme så er jobben til en hydrogendetektor å oppdage lekkasjen og deretter skal ventilen til hydrogentankene operere for å forhindre en stor mengde hydrogengasslekkasje.
2. Dersom kjøretøyet blir påvirket av en ytre påkjenning som registreres og tolkes å være en kollisjon, så skal ventilen til hydrogentankene operere for å forhindre en stor mengde hydrogengasslekkasje.

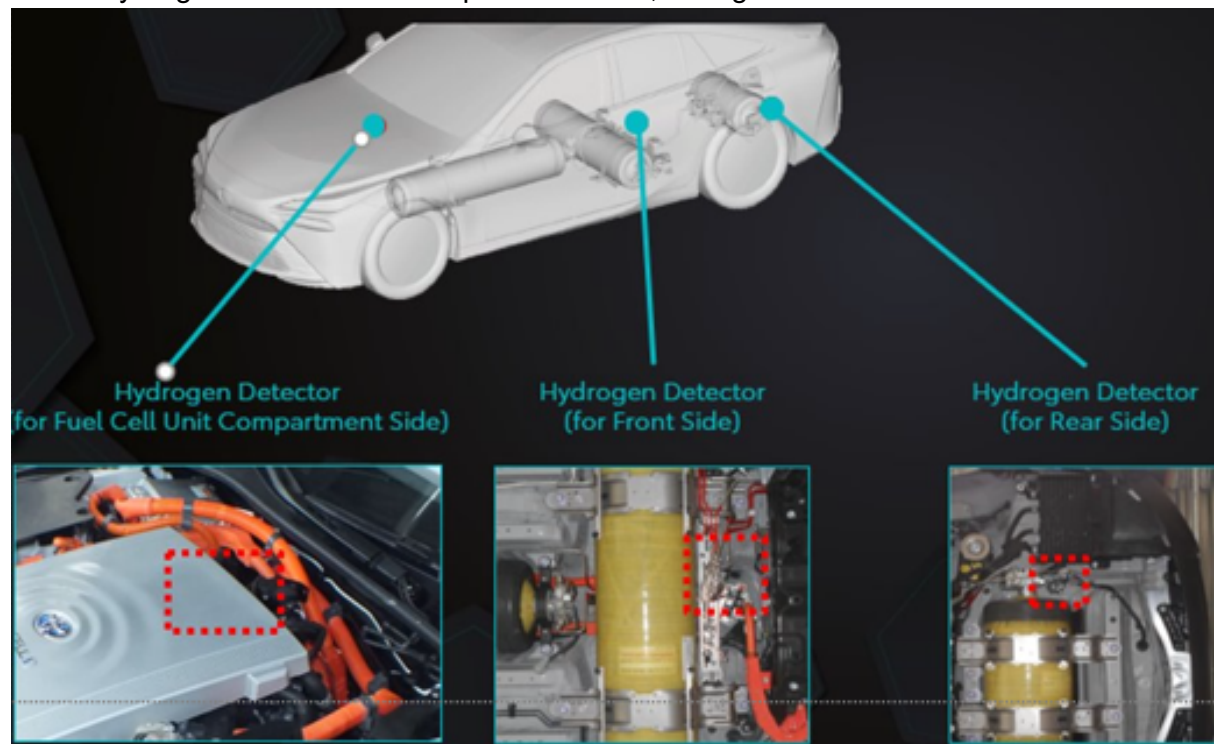
3. Unngå akkumulering av hydrogengass:

I et tilfelle hvor det forekommer lekkasje av hydrogengass, så er bilen designet for å unngå at hydrogengass akkumuleres på innsiden, altså er bilen designet for å forhindre at hydrogengass samler seg på innsiden av bilen. Dette er realisert ved at hydrogentankene er montert på utsiden av bilen. Når hydrogengass lekker på utsiden vil hydrogengassen pga. dens massetetthet slik beskrevet i hydrogenkapittelet, fly til himmels med en svært stor hastighet (72 km/t) og bort fra bil og mennesker. Ettersom hydrogengass er så relativt lett så vil det være naturlig at hvis det oppstår akkumulasjon av hydrogengass, så skjer dette under taket. Derfor er det alltid plassert hydrogensensorer på slike plasser [20].

4. Holde tennkilder unna hydrogenkomponenter:

For å unngå at potensielle gnister havner i kontakt med hydrogen, er tennkilder, kilder som potensielt sett kan skape gnister, plassert unna hydrogensystemet.

Hydrogendetektorer er som nevnt sentrale i hydrogenbiler, ettersom de oppdager eventuell hydrogengasslekkasje som av mennesker ikke vil kunne oppdages på grunn av hydrogenets egenskaper (som tidligere beskrevet). Hydrogendetektorer finnes av sikkerhetsmessige årsaker for å kunne varsle sjåfør om eventuelle hydrogengasslekkasjer. I Toyota Mirai 2 er det tre hydrogendetektorer som er plassert i bilen, slik figuren under viser.



Figur 4.19. Hydrogentektorer og deres plasseringer i Mirai 2 [3]

Hydrogendetektorer er sentrale i sikkerhetssystemet i hydrogenbiler, og er følgelig komponenter som må virke korrekt. Det er derfor viktig at de fungerer, samt er i en god tilstand. Dette kan tenkes å være noen av årsakene til at hydrogendetektorene skal vedlikeholdes med et serviceintervall per kjørt 15 000 km eller én gang i året [3].

4.3.3. Hydrogensikkerhet

I kapittel 4.2. ble hydrogenegenskaper definert. Det ble skrevet om den lave tenningsenergien på ca. 0,017 mJ som skal til for å antenne hydrogen. Naturligvis medfører dette en sikkerhetstrussel og for å ta hensyn til dette, så ble det allerede i Mirai 1 installert antistatisk gulv [20]. Antistatiske industrigulv hemmer genereringen av elektrostatisk utladning som er pulsen av statisk elektrisitet som skjer når en ladet person eller overflate kommer i kontakt med en annen gjenstand [67].

Hydrogentank Stengeventil (Tank Shut Valve) – Dersom en hydrogengasslekkasje skulle oppstå, vil en elektromagnetisk ventil stenge, noe som stopper lekkasje av hydrogen gassen [13].

Trykkavlastningsenhet (Pressure Relieve Device) – I en situasjon hvor det skulle være bilbrann er det viktig å redusere muligheten for at brudd på hydrogentankene kan oppstå.

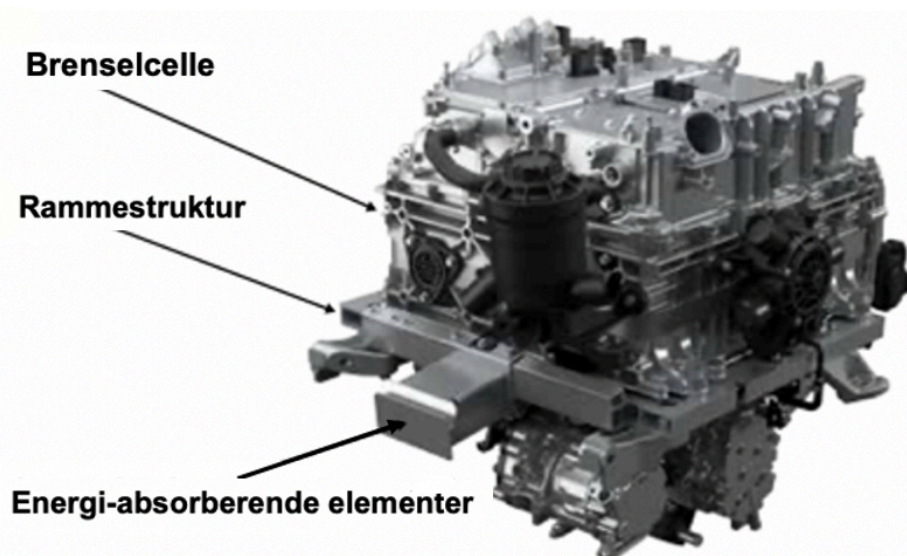
Dette oppnås ved at hydrogengassen inne i hydrogentankene ventileres fra trykkavlastnings-enheten, til baksiden av kjøretøyet i en nedadgående diagonal retning [13].

Det kan tenkes at hensikten med trykkavlastningsenheten er fordi en ønsker å redusere trykket i hydrogentankene ettersom trykket i et isolert lukket system vil øke dersom temperaturen til gassen i det isolerte systemet øker. Dette fordi at ved en bilbrann vil temperaturen øke og ved å studere formelen for den ideelle gassloven [59] som er $PV = nRT$, hvor P trykk, V: volum, n: stoffmengde, R: en konstant og T: temperatur, så ser vi at det er et proporsjonalt forhold mellom trykk og temperatur. Øker temperaturen så øker trykket (hvis alle andre variabler holdes konstante), hvilket vil øke sjansen for at hydrogentanken kan sprekke.

Temperatursensor Hydrogentank (Hydrogen Tank Temperature Sensor) – har som oppgave å overvåke temperaturen inne i hydrogentankene [13]

4.3.4. Kollisjonssikkerhet med hydrogen og brenselcelle

I et tilfelle hvor det skulle skje en kollisjon så er en av de mest sentrale komponentene å beskytte; brenselcelle-stabel sammenstillingen. For å beskytte denne svært sentrale komponenten, er det bygget en ramme med energi-absorberende elementer av aluminium. En stor fordel med å bruke aluminium er at aluminium har svært god evne til å absorbere energi (støtet fra en kollisjon) og vil følgelig beskytte brenselcelle-stabelsammenstillingen. De energiabsorberende elementene har også høy bøyestivhet som bidrar til å beskytte hovedkomponenten mot bøyedeformasjon ved kollisjoner [14]. Det er selvsagt begrenset hvor mye de energi-absorberende elementene kan beskytte brenselcellen, da det er innlysende at dersom en personbil kolliderer med et vogntog i høy hastighet, så har det lite å si om personbilen er en brenselcellebil eller en bil med forbrenningsmotor. Nedenfor vises et bilde av brenselcellen og hvordan den er beskyttet.



Figur 4.20. Beskyttende struktur rundt brenselcellen [14]

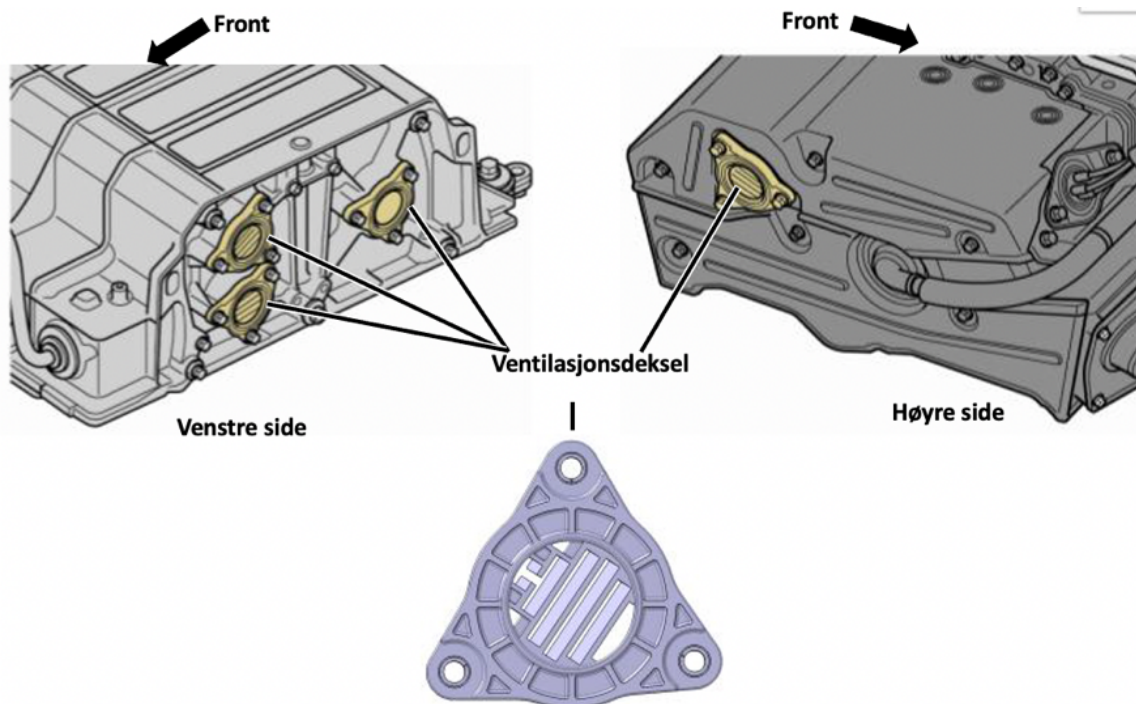
Ifølge Toyota er essensielle komponenter posisjonert mot midten av bilen, dette fordi at ved eventuelle kollisjoner skal dette være blant de siste komponentene som blir påvirket av støtet fra kollisjonen [35].

Ventilasjon

Det ble i figur 4.16 vist at hydrogen både kan brenne og eksplodere ved bestemte konsentrasjonsintervaller. Den nedre brennbarhetsgrense/antennelighet er 4% og derfor er det viktig når man skal jobbe med en hydrogenbil på et verksted, at man sørger for god nok ventilasjon (lufting), slik at konsentrasjonen av hydrogen ikke kommer opp i 4%, særlig fordi det er svært lite tenningsenergi til for å antenne hydrogen ved brennbare konsentrasjoner. Videre er det også viktig at luften man ventilerer med, ikke består av resirkulert luft. Dette fordi hydrogenet i så fall vil forbli inne i rommet (verkstedet) [69]. Toyota hevder også [69] at det ikke har skjedd noen hydrogeneksplosjoner i godt ventilerte steder.

Ventilasjonsdeksel [19]

Brenselcellestabel-sammenstillingen er både vann- og lufttett, men det vil alltid være en form for hydrogenlekkasje som er uunngåelig. For ikke å bygge opp konsentrasjonsnivåer inne i brenselcellestabel-sammenstillingen som overstiger den nedre brennbarhetsgrensen til hydrogen på 4%, som kan skape branner, så er brenselcellestabel-sammenstillingen utstyrt med ventilasjonsdeksler. Disse skal sørge for ventilasjon og unngå at hydrogenkonsentrasjoner som vil være risikofylte kan oppstå.



Figur 4.21: Ventilasjonsdeksler plassert på brenselcellestabel-sammenstillingen [19]

Tilleggsbidrag – Hyundai [10]

Hyundai hevder også at brenselcellebiler er trygge, tatt i betraktning den tilpassede sikkerhetsteknologien som eksisterer i slike biler. De hevder at det aldri har vært noen ulykke med brenselcellebiler som følge av hydrogenlekkasje og at blant mange branntester, hvor de har satt fyr på brenselcellebiler, så vil hydrogentanken motstå å brenne og vil heller ikke eksplodere. Hyundai skriver at hydrogentankene er dekket av et brannsikkert belegg og at når det gjelder kjøretøybranner, lekkasjer og eksplosjoner, så er brenselcellebiler (hydrogenbiler), målbart sikrere enn bensinbiler.

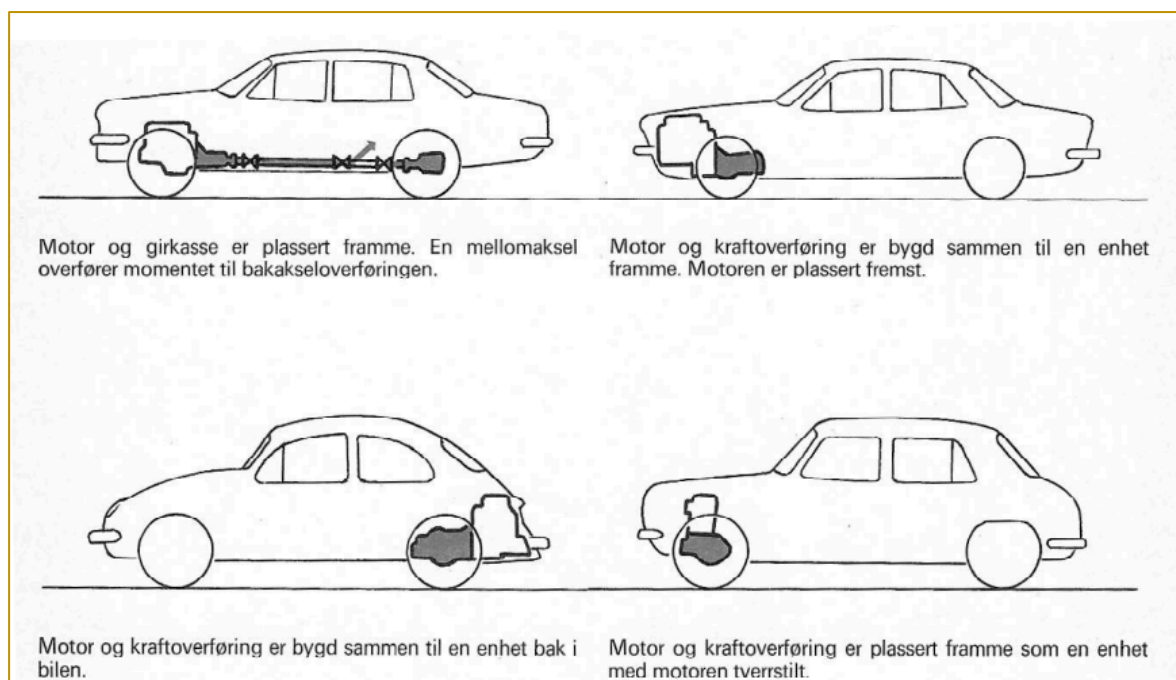
4.4. Drivverk og drivkraftteori med fokus på brenselcellebiler

Hensikten med dette kapittelet er å få en innføring i drivverkets hovedkomponenter i en brenselcellebil med utgangspunkt i Toyota Mirai 2. Videre er det fra et ingeniørfaglig ståsted viktig å utvikle et teoretiske grunnlag i drivkraftteori, samt formelverk deriblant for å kunne utvikle moment-, effekt- og drivkraftkurver. Disse kurvene vil muliggjøre det å utføre diverse drivkraftberegninger av brenselcellebilen.

4.4.1. En kort innføring i drivverk

Definisjonen på drivverkskomponenter er «en betegnelse på de komponentene som overfører motorens dreiemoment til drivhjulene» [4]. Dette vil være definisjonen jeg tar utgangspunkt i når jeg senere definerer brenselcellebilens drivverkskomponenter i Mirai 2.

Når en bilprodusent planlegger konstruksjonen av en bil, kan plasseringen av ulike komponenter være med på å bestemme ulike egenskaper ved bilen, blant annet om den er forhjulsdriven eller bakhjulsdriven, altså hvor vidt det er drivkraft på hhv. forhjulene eller bakhjulene. Figuren under viser er en oversikt over et utvalgt antall måter å plassere motor og girkasse, som vil være med på å bestemme hvordan kraftoverføringen vil skje.



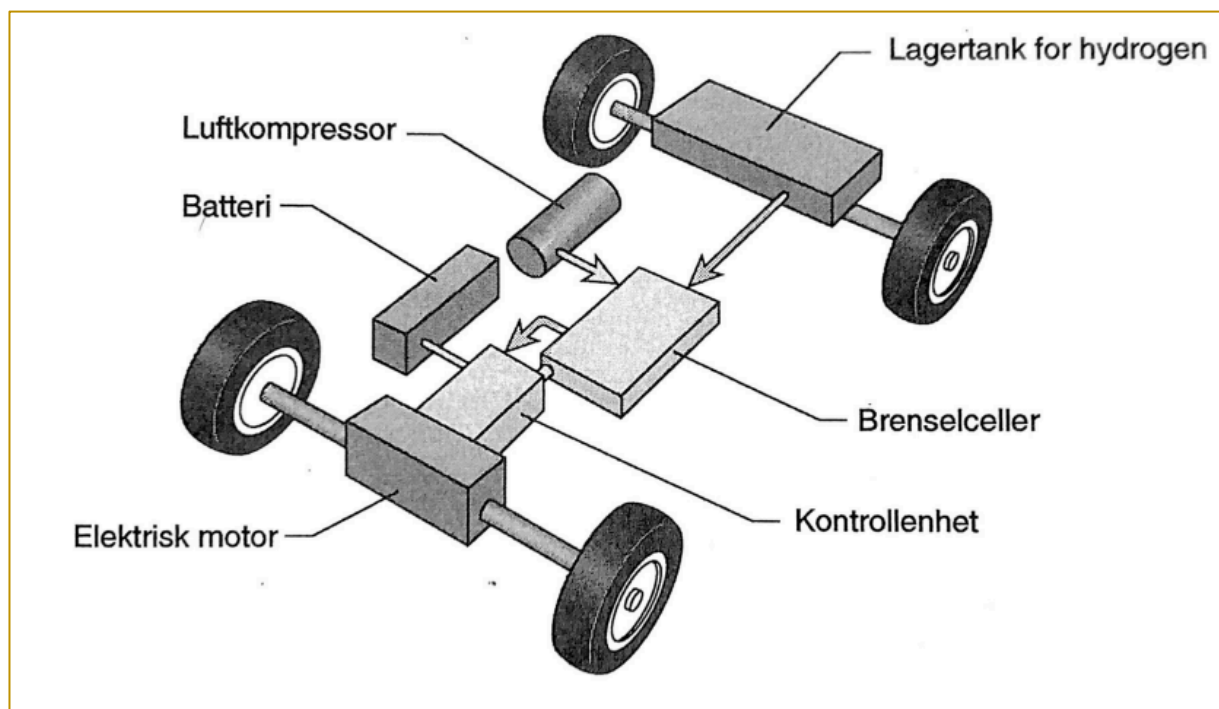
Figur 4.22. Diverse plasseringer av motorer og drivverk [4]

Avhengig av om det er bensin-, diesel-, El- eller brenselcellebiler, så vil drivverket kunne bestå av ulike typer drivverkskomponenter og kombinasjoner av disse. Drivverket i en bil vil kunne bestå av [4]:

1. Kopligng (clutch)
2. Girkasse (manuell eller automatisk)
3. Mellomaksel med universalledd (kan ha elastisk kopligng)
4. Differensial (en eller flere)
5. Drivaksler med homokinetiske ledd (forhjulsdriфт)
6. Eventuell navreduksjon (tyngre kjøretøy)

Drivverkskomponentene som diskuteres videre i dette kapittelet tar ikke utgangspunkt i alle de seks komponentene nevnt over, men tar utgangspunkt i drivverket til Toyota Mirai 2. generasjon. Årsaken til dette er at det som er av interesse på et overordnet nivå med dette kapittelet i masteroppgaven, er å få en bedre forståelse for drivverket i biler med brenselceller som benytter hydrogengass som drivstoff, med et fokus på Toyota Mirai.

I Motorteknikk; Bilteknikk [8] blir brenselcellebiler forklart, og selv om boka er fra 2002 og at det kan argumenteres for at dette vil si at boka er noe utdatert, så er mange av prinsippene for brenselceller like aktuelle i dag. Figuren under brukes for å vise en enkel framstilling av noen sentrale hovedkomponenter i en bil med brenselcelle:



Figur 4.23: Enkel skisse av brenselcellebilen og noen sentrale komponenter [8]

4.4.2. Drivverkets hovedkomponenter i brenselcellebilen Mirai 2

Under presenteres og beskrives de ulike hoved-drivverkskomponentene i brenselcellebilen (hydrogenbilen) Mirai 2. For å beskrive drivverkskomponentene i hydrogenbilen Mirai 2, så bruker jeg i oppgaven begrepet «Elektrisk motor + drivverk», hvor drivverket i Mirai 2 består av et reduksjonsgir og en differensial. Oppgaven tar dog for seg begrepet «transaksel», da dette kan skape misforståelser og forvirring blant norske mekanikere og teknisk interesserte, når man på internett (særlig på engelsk), kan møte mye på begrepet transaksel (transaxle) når man leser om hydrogenbilen Toyota Mirai.

Elektrisk motor + drivverk (Transaxle)

En transaksel (transaxle) er en enhet bestående av den elektriske motoren og drivverkskomponentene, som i Mirai 2 omfatter:

- Et reduksjonsgir
- En differensial

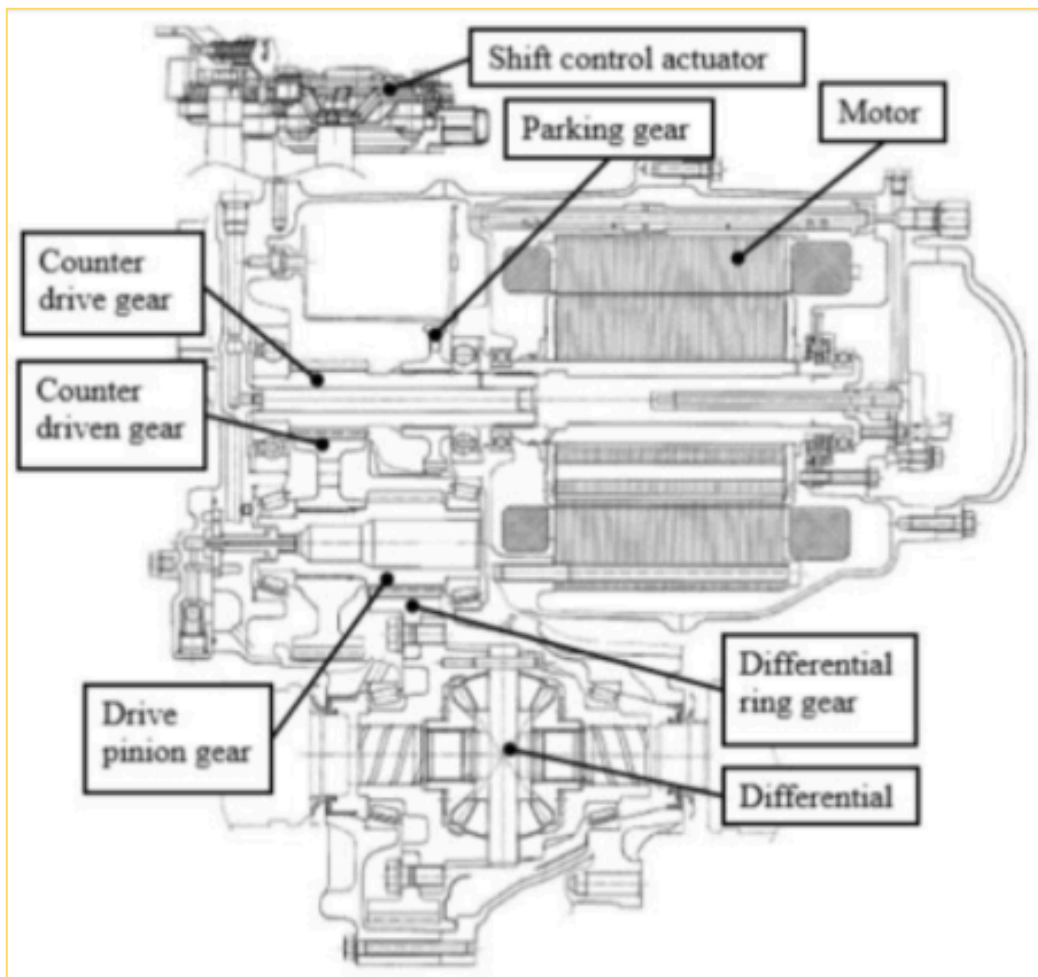
Transakselen kan forklares som en enkel mekanisk enhet som kombinerer funksjonene til bilens girkasse, aksel og differensial, i en integrert enhet [16].

→ Transakselen kan altså forstås som EI-motor + «drivverkspakken», som i Mirai 2 tilsvarer henholdsvis EI-motor + reduksjonsgir og differensial.

Den ene hovedforskjellen mellom Mirai 1 og Mirai 2 er at EI-motor + drivverk er plassert i motorrommet foran i Mirai 1, mens i Mirai 2 er de plassert ved bakakslingen. Dette er årsaken til at Mirai 1 er forhjulsdreven, mens Mirai 2 er bakhjulsdreven.

Under vises et tverrsnitt av EI-motor + drivverk (transaksel Q710) som er i den nye Mirai 2. generasjon. Følgende oversettelser er relevante:

- «Counter drive gear» og «Counter driven gear» refererer til hhv. det drivende og det drevne tannhjulet i Reduksjonsgiret.
- «Differential» er differensialen
- «Motor» referer til den elektriske motoren.



Figur 4.24: Tverrsnittbilde av EI-motor + «drivverkspakken» i Mirai 2 [15]

Elektrisk motor

Den elektriske motoren i nye Mirai er av typen «Permanent Magnet Synchronous Motor» som har et maks dreiemoment på 300 Nm [13].

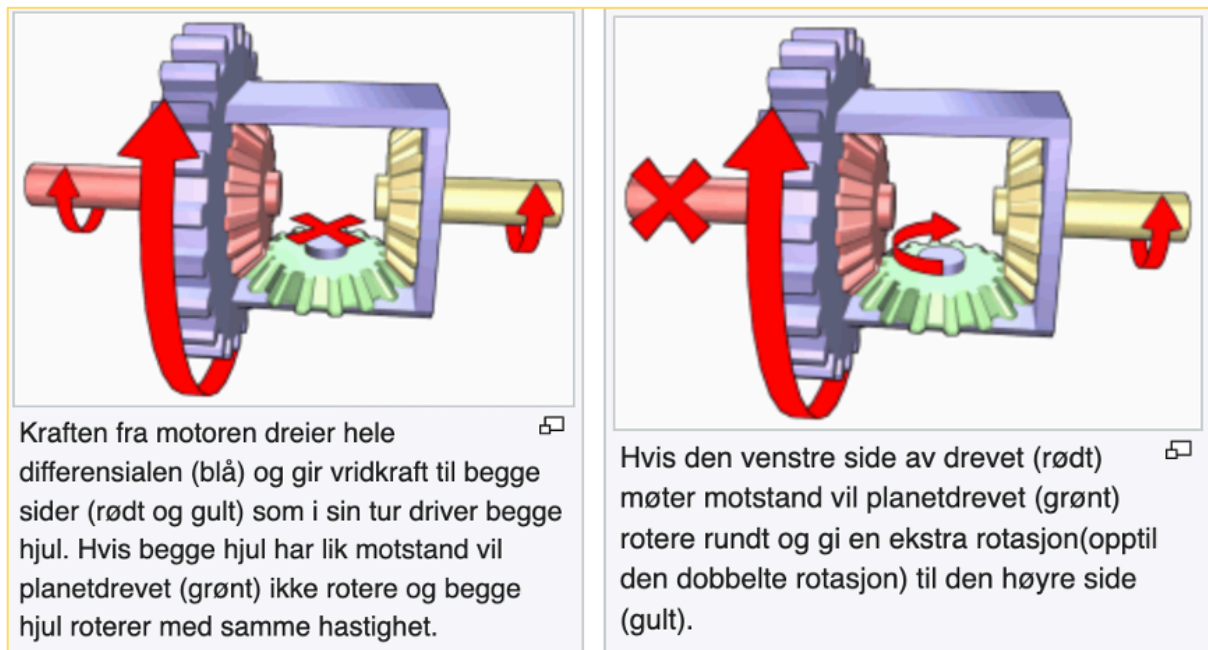
Toyota Mirai 1 og 2 benytter vekselstrømsmotorer, altså elektromotorer som basert på tre faser. Når du skal ha en brenselcellebil til å kjøre i revers så gjelder samme prinsippet som i en elbil; man bytter bare to av fasene til motoren [77].

Reduksjonsgir

I en bil drevet av en elektrisk motor, benyttes det et reduksjonsgir som har som oppgave å redusere hastigheten ut til hjulene ved å redusere hastigheten ut fra den elektriske motoren.

Differensial: På drivakselen til et kjøretøy (i Mirai 2 tilsvarer dette bakakselen), er det nødvendig med en utvekslingsmekanisme for å fordele ulikt dreiemoment fra motoren til drivhjulene ved kjøring i kurver. Årsaken til dette er blant annet at det ved kjøring i kurver er nødvendig at drivhjulene roterer med ulik hastighet, ettersom hjulet på innersvingen vil ha en mindre radius og dermed mindre strekning den skal tilbakelegge enn det ytre hjulet. For å oppnå ulikt dreiemoment blant annet ved kurvekjøring er det i Mirai en utvekslingsmekanisme; en differensial.

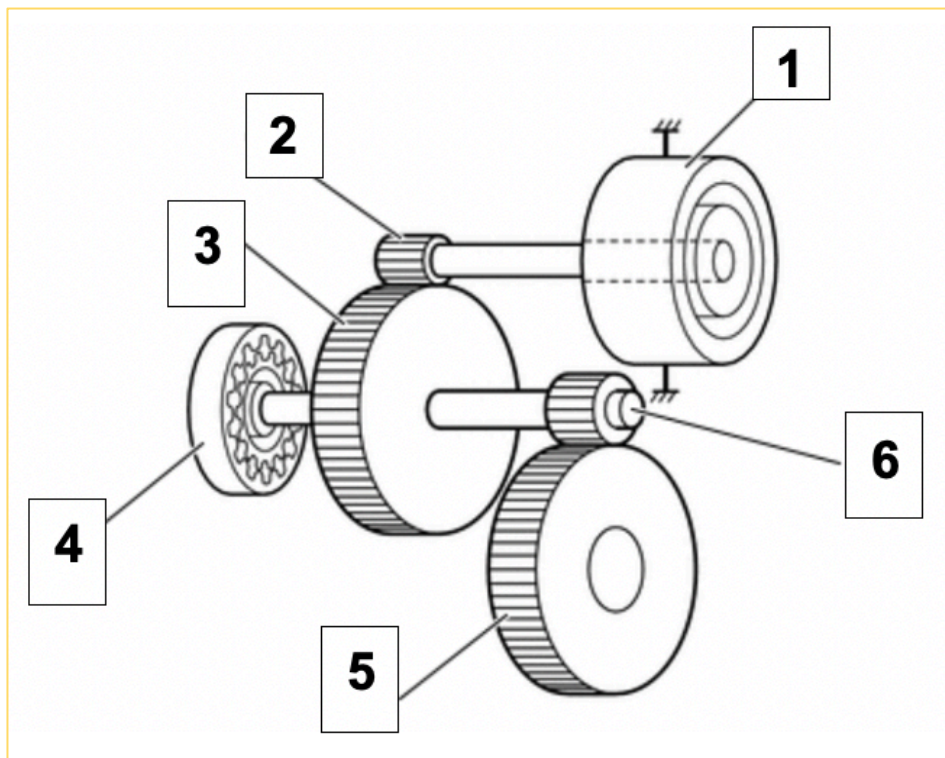
Figuren under illustrerer og forklarerer med tekst virkemåten til en differensial.



Figur 4.25: Differensial med forklaring av virkemåte [61]

Figuren under illustrerer El-motor + tannhjulparene i drivverkskomponentene i Mirai 2:

- Del nummer 1 illustrerer den elektriske motoren
- Del nummer. 2 og 3 illustrerer henholdsvis det drivende og det drevne tannhjulet i reduksjonsgiret.
- Del nummer 6 og 5 illustrerer tannhjulparet i det som kan betraktes å være differensialen i bilen.







Figur 4.26: El-motor + tannhjulparene i drivverket til Mirai 2 [13]

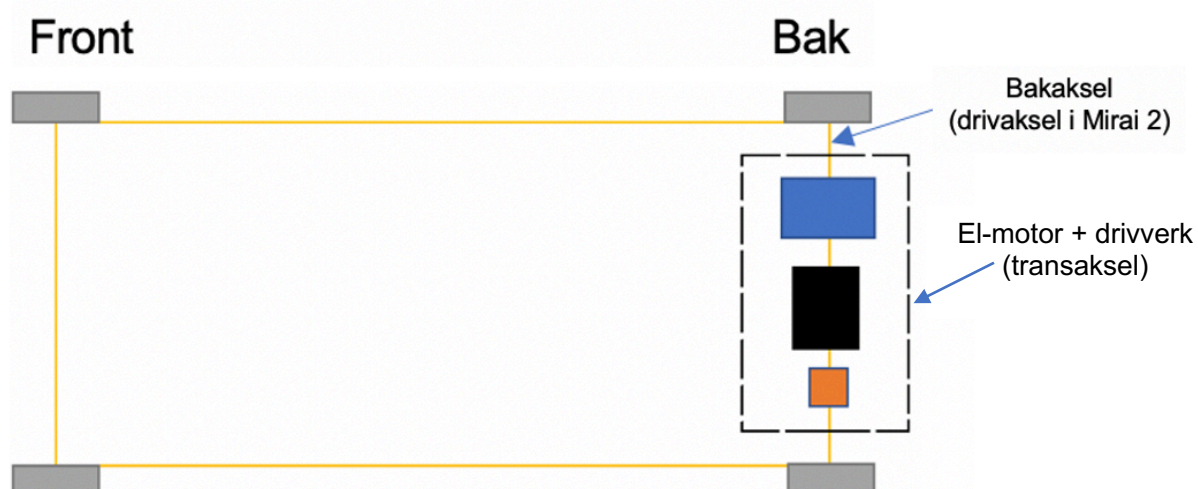
4.4.3. Drivverksoversikt Toyota Mirai 2

I dette delkapittelet presenterer jeg en illustrativ figur av EI-motor + drivverket i Toyota Mirai 2. Tabell 4.5. viser boksfigurer av den elektriske motoren + drivverket. I figur 4.26d vises disse inni en stiplet boks. Denne stiplede boksen skal illustrere EI-motor og drivverket som en del av en integrert enhet, som vi så tverrsnittsbilde av i figur 4.26 på forrige side.

Tabell 4.5: Oversikt over drivverkskomponentene

Figur	Komponentnavn	Figur	Komponentnavn
 Figur 4.26a: Boksfigur av EI-motor	Elektrisk motor	 Figur 4.26b: Boksfigur av differensial	Differensial
 Figur 4.26c: Boksfigur av reduksjonsgir	Reduksjonsgir	 Figur 4.26d: Boksfigur av EI-motor + drivverk (transaksel)	EI-motor + drivverk (transaksel)

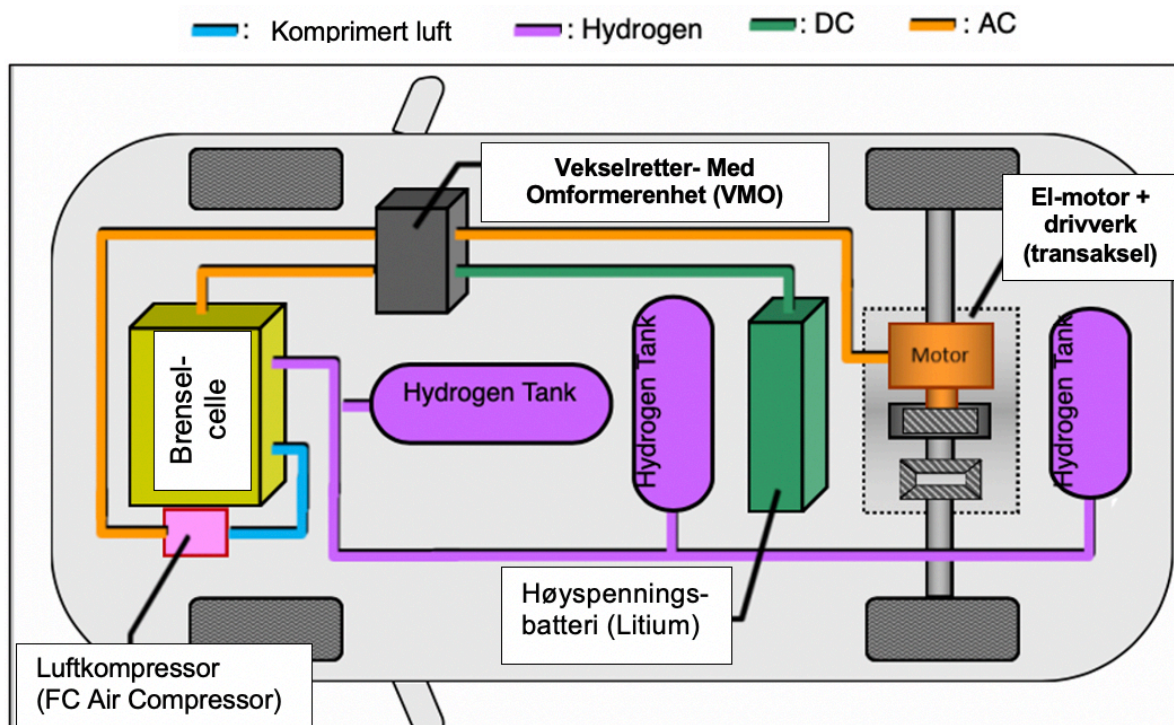
Figuren under viser et oversiktsbilde av drivverket. Figurene 4.26a-d viser komponenter som er tegnet inn i oversiktsfiguren over drivverket i figuren under.



Figur 4.27. oversikt over drivverket i Mirai 2.

4.4.4. Virkemåte for brenselcellebilen Mirai 2

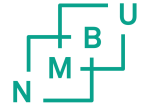
Fram til nå er ulike sentrale komponenter og drivverkskomponenter definert og beskrevet. I denne seksjonen er målet å skape forståelse for hvordan brenselcellebiler virker, ved å gjøre rede for hvordan de ulike komponentene samvirker, i prosessen fra hydrogengass fylles i hydrogentankene, til bilen drives av den elektriske motoren. Utgangspunktet for forklaringen vil være figuren under, som viser en oversikt over sentrale komponenter med hensyn på komponenter som er bidragsgivende for framdrift i Toyota Mirai 2.



Figur 4.28: Oversikt over sentrale komponenter inkludert drivverkskomponenter i Mirai 2 [12]

Virkemåten til en brenselcellebil på ti steg

- Utgangspunkt: Toyota Mirai 2, figur 4.28.
 - Viktige bemerkninger: Mirai opererer noe ulikt ved ulike kjøretilfeller (for eksempel kjøring ved oppstart, stor akselerasjon, retardasjon, osv.)
 - Antakelse: det er hydrogengass i hydrogentankene og høyspenningsbatteriet er oppladet.
 - Forklaringen under er basert på tidligere forklaringer av komponentene.
1. Hydrogengass fylles i de tre spesialkonstruerte hydrogentankene, på hydrogenstasjoner.
 2. Vekselretter- med omformerenhet (VMO) får likestrøm (DC) fra høyspenningsbatteriet. Ettersom EI-motoren i bilen er en vekselspenningsbasert motor (EI-motor), er det nødvendig å omforme spenningen fra DC til AC, før EI-motor forsynes med spenning fra høyspenningsbatteriet.



3. Vekselretteren i VMO omformer likestrøm til vekselstrøm.
4. Omformeren i VMO oppjusterer spenningen tilsendt fra høyspenningsbatteriet fra 310,8V til 650V.
5. Spenningen fra høyspenningsbatteriet er nå klart til å kunne forsyne den elektriske motoren og til å drive luftkompressoren.
6. Luftkompressoren komprimerer luften basert på signaler fra Elektrisk Kjøretøy kontrollstyreenhet, basert på hvor mye kraft det er ønskelig at skal skapes i brenselcellen.
7. Basert på kjørestil, dvs. om sjåfør ønsker å akselerere opp i høy hastighet eller kjøre med jevn hastighet i tettbebygde strøk, så vil brenselcellen generere nødvendig mengde spenning og denne spenningen vil sendes til VMO.
8. Brenselcelle-økningssomformeren vil oppjustere spenningen i brenselcellen til 650V.
9. Spenningen fra brenselcellen sendes til VMO som nå går til den elektriske motoren og/eller til høyspenningsbatteriet, dersom det for eksempel er generert overflødig spenning.
10. Bilen kan nå drives av den elektriske motoren.

Kommentar:

- Dersom kjørestilen krever mye elektrisk energi (eksempelvis ved stor akselerasjon), så vil spenningen som sendes til den elektriske motoren være en kombinasjon av den oppjusterte spenningen fra høyspenningsbatteriet på 650V (opprinnelig 310,8V) og spenningen generert i brenselcellen.
- Den elektriske motoren vil teoretisk ha et høyt maksmoment helt fra starten av turtallsområdet. El-motorens turtall reduseres derfor gjennom bruk av reduksjonsgiret. Til slutt vil dreiemomentet fordeles og sendes til drivhjulene gjennom differensialen.



4.4.5. Strømforsyning ved ulike kjøretilstander

Toyota Mirai bruker et system som veksler mellom bruken av elektrisk kraft generert fra brenselcellen og/eller tatt ut fra høyspenningsbatteriet [13]. I dette delkapittelet presenteres overordnede prinsipper i forhold til retningen, samt til hvilke komponenter den elektriske strømmen går, som avhenger av bilens kjøretilstand. Grunnlaget for beskrivelsene/forklaringene er [13]

1. Ladning ved stans

- Når bilen har stanset og batterinivået (State Of Charge (SOC)) er lavt, så vil brenselcellen generere elektrisitet som går til høyspenningsbatteriene når bilen stanser.

2. Bilen begynner å bevege seg/ kjøring ved lav motstand

- Når bilen er i stans og begynner å bevege seg ved normale kjøreforhold og lav kjøre motstand, så vil den elektriske motoren drives alene av høyspenningsbatteriet.

3. Jevn kjøretilstand

- Ved jevn kjøretilstand vil den elektriske motoren drives av brenselcellen, som skaper bilens framdrift.

4. Kjøring ved akselerasjon

- Når det er ønskelig å øke hastigheten med en akselerasjon som er større enn det som er tilfellet i punkt 2, så vil den elektriske effekten fra brenselcellen økes ved å øke øknings-forholdet i brenselcelle-økningsomformereren. Den resterende elektriske energien suppleres av høyspenningsbatteriet for å akselerere bilen. Dette vil si at ved akselerasjon vil brenselcellen og høyspenningsbatteriet jobbe i kombinasjon for å akselerere bilen.

5. Kjøring ved retardasjon/ bremsing

- Når bilen retarderer/bremser vil rotasjonen til hjulene kunne være med på å skape regenerativ effekt. Dette skjer altså ved at hjulets rotasjon vil være med på å rotere den elektriske motoren, som nå vil fungere som en generator. På denne måten vil kinetisk energi kunne konverteres til elektrisk energi, hvor den elektriske energien vil kunne utnyttes til å lade høyspenningsbatteriet eller andre elektriske komponenter i bilen, som for eksempel luftkompressoren. Dette prinsippet kalles også for regenerativ bremsing

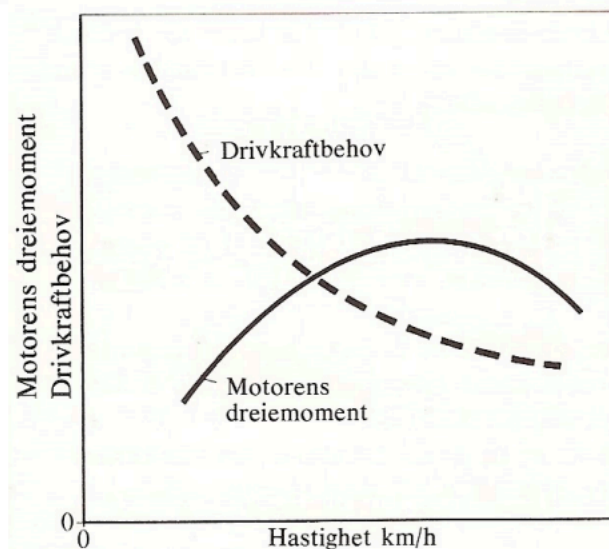
6. Kjøring i revers

- Kjøring i revers skjer ved at høyspenningsbatteriet brukes til å drive den elektriske motoren i motsatt retning i forhold til retningen når biler drives framover. Samme pris som beskrevet i stad gjelder: to av fasene bytter plass [77].

4.4.6. Motorens dreiemoment og drivkraftbehov

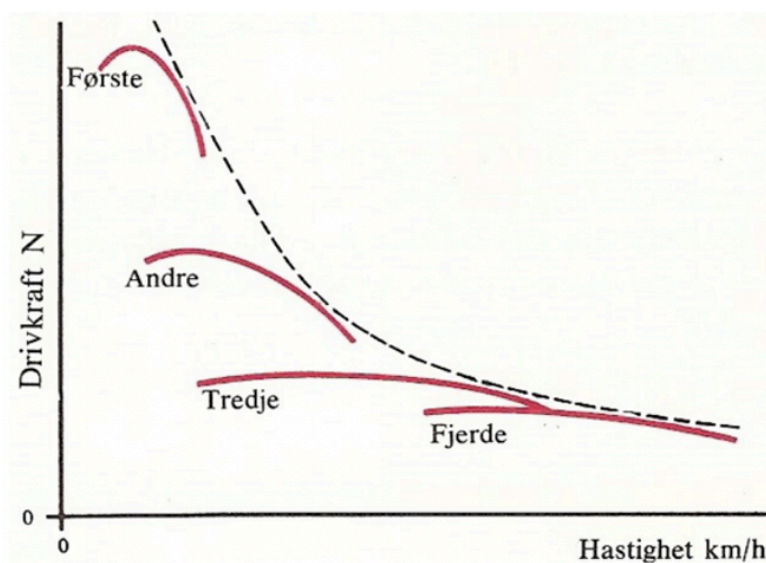
Hensikten med en gjennomgang av motorens dreiemoment, drivkraftbehov, utvekslingsforhold og de ulike former for kjøremotstand, er å forstå hvordan dette er forhold som påvirker bilens kjøreegenskaper, samt akselerasjonsevne.

Moment- og drivkraftbehovkurve for en bil med forbrenningsmotor:



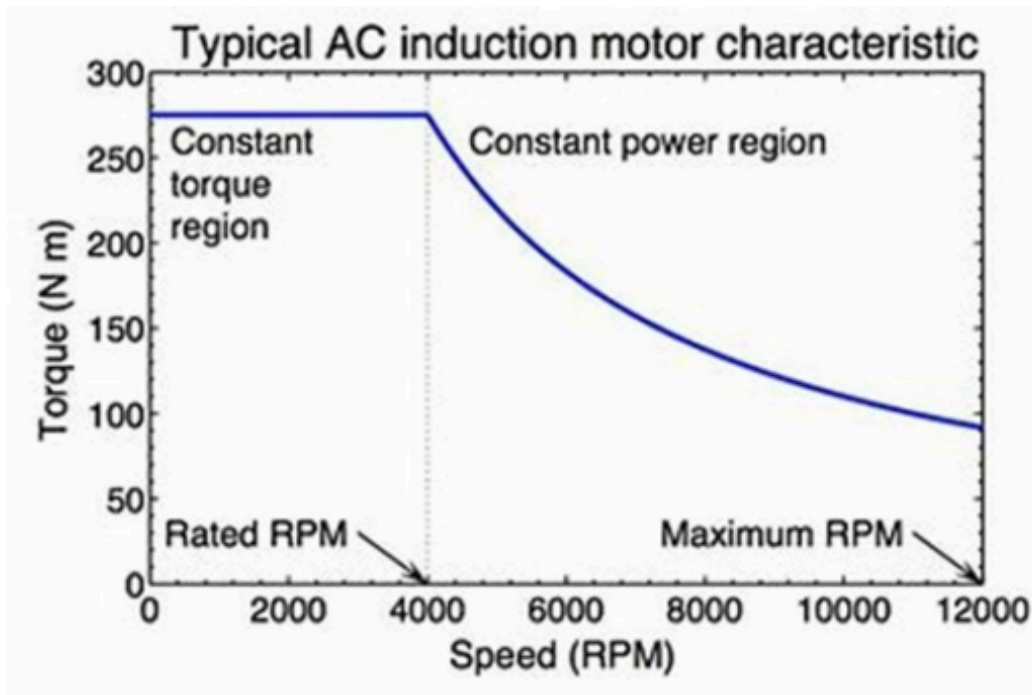
Figur 4.29: motorens dreiemoment og drivkraftbehov for en bil med forbrenningsmotor [11].

Figuren over viser dreiemomentkurven, samt drivkraftbehovet til en klassisk bil med forbrenningsmotor. Basert på figuren over observerer vi at for en bil med forbrenningsmotor vil vanligvis ikke kurven for motorens dreiemoment samsvare med kurven for drivkraftbehovet som er nødvendig for å oppnå de ulike hastighetene. For å løse dette problemet i kjøretøy med forbrenningsmotor så kan momentet fra motoren omformes til drivkraft ved å benytte utveksling i en girkasse og en differensial [11]. Figuren under illustrerer dette poenget.



Figur 4.30: Momentet til motoren i figur 4.29 omformet til drivkraft ved bruk av utveksling i en girkasse og en differensial [11]

Figuren under viser hvordan et typisk momentdiagram for et kjøretøy med elektrisk motor kan se ut. Det nevnes også at for den elektriske motoren til Toyota Mirai 2 så strekker turtallsområdet seg til 16500 RPM hvilket underbygger at elektriske motorer har turtallsområder som vanligvis kan antas å være i hvert fall dobbelt så store som turtallsområdet for biler med forbrenningsmotor.



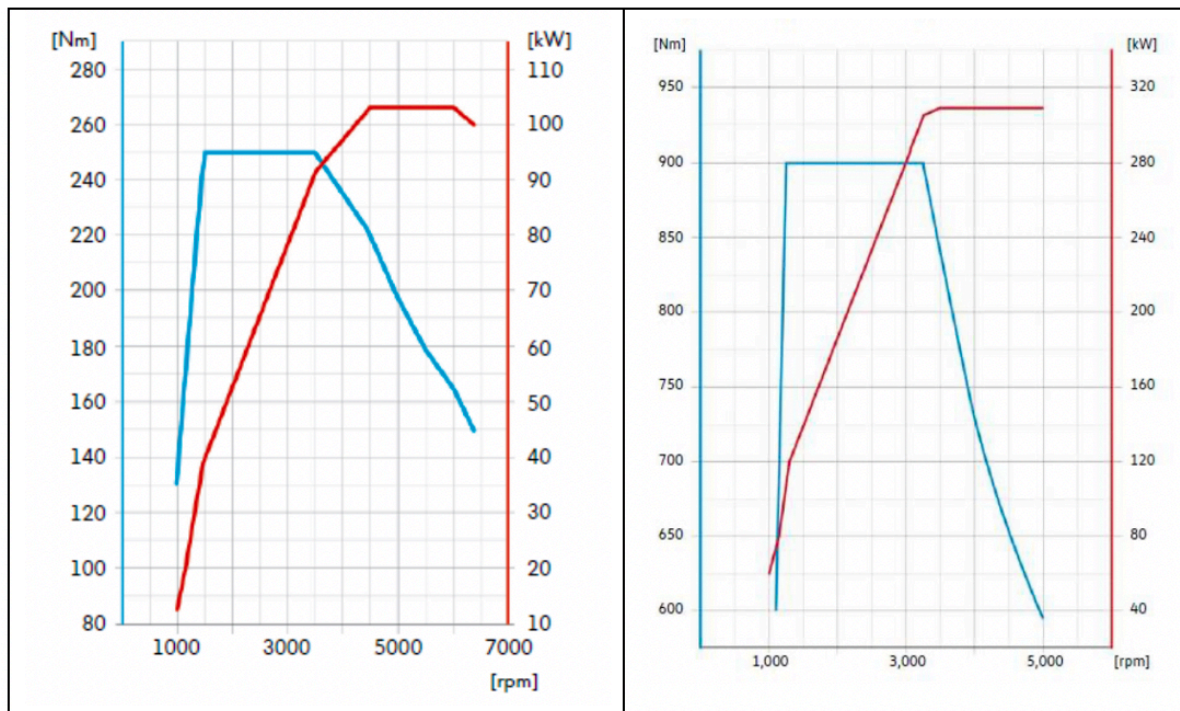
figur 4.31: Motorens dreiemomentdiagram for en typisk EI-motor [11].

Følgende observasjoner kan trekkes ut ved sammenlikning av momentdiagrammet til de to typene motorer i figur 4.29 og 4.31 over, forutsatt at momentdiagrammene i figurene over gir et generelt og representativt bilde av den kategorien motor de to typene representerer:

1. Turtallsområdet til forbrenningsmotoren strekker seg vanligvis fra 0-6000 (i praksis ca. 800-6000) RPM, mens for en elektrisk motor så strekker den seg omtrent dobbelt så langt, altså fra 0 – 12 000 RPM.
2. Dreiemomentet til en elektrisk motor har et konstant høyt dreiemoment fram til 4000 RPM og deretter så følger dreiemomentkurven en $\langle\frac{1}{x}\rangle$ -kurve.

Jeg har brukt Figur 4.29 som viste moment- og drivkraftbehovkurven for en typisk bil med forbrenningsmotor, fordi den illustrerer på en tydelig måte at det ikke er samsvar mellom dreiemomentet og drivkraftbehovet. Momentkurven i figur 4.29 kan dog kritiseres for å være noe utdatert, da det i nyere, moderne biler er en forbedret reguleringsteknikk som gir momentkurver for Otto-moren (bensinmotoren) og dieselmotoren som kan se ut som kurvene i figurene under:

Dreiemoment- og effektdiagram for nyere forbrenningsmotorer



Figur 4.32. Effekt- og dreiemomentkurver for 4,0L bensinmotor m/turbo (t.v.) og 4,0L dieselmotor m/turbo (t.h.) [68]

De nye formene på momentkurvene til de moderne forbrenningsmotorene kommer blant annet av moderne innsprøytningsystemer, høyt innsprøytningsstrykk og dosert innsprøytning for dieselmotorer. For Otto-motoren (bensinmotoren) kommer også forbedret tenningsanlegg inn som en viktig faktor, som gir bedre styring på momentkurvene [73].

4.4.7. Utvekslingsforholdet (i)

- Kapittel 4.4.7 er basert på [11].

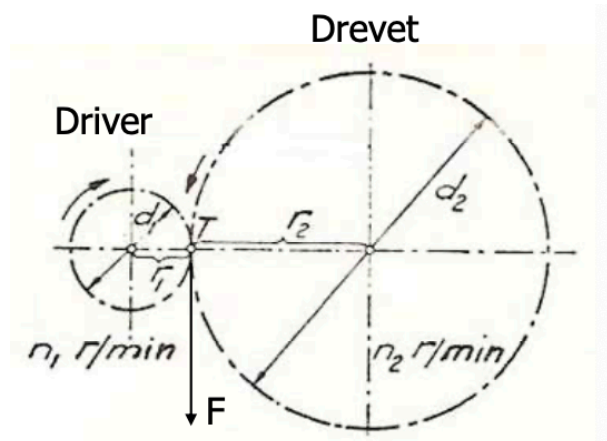
$$v_1 = v_2$$

$$2\pi \cdot n_1 \cdot r_1 = 2\pi \cdot n_2 \cdot r_2$$

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{r_2}{r_1} = \frac{d_2}{d_1} \quad (4.1)$$

- v_1 og v_2 er henholdsvis periferihastigheten i kontaktpunktene til hhv. drivende og drevet aksel
- n_1 og n_2 er henholdsvis turtallet i RPM til hhv. drivende og drevet aksel
- r_1 og r_2 er radiusen, mens d_1 og d_2 er diameter. Indeks 1 og 2 referer til hhv. drivende og drevet aksel.

Disse forholdene defineres som utvekslingsforholdet (i), og kan også gå under betegnelsen oversetningsforholdet.



Figur 4.33. Hjelpeillustrasjon utvekslingsforhold [11]

I drivkraftteorien [11] blir også formelverket for utvekslingsforholdet når vi kjenner til antall tenner på tannhjulene. Dette utvekslingsforholdet utledes og presenteres som:

$$i = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (4.2)$$

- Z_1 : antall tenner på drivende tannhjul
- Z_2 : antall tenner på drevet tannhjul

Generell formel uavhengig av antallet tannhjul eller aksler:

$$i_{total} = \frac{n_{inn}}{n_{ut}} = \frac{\text{produkt av drevne } (Z)}{\text{produkt av drivende } (Z)} \quad (4.3)$$

4.4.8. Teoretisk formelverk – Drivverk og drivkraftberegninger

Grunnlaget for teorien som forklares i dette kapittelet er drivkraftteorien er [11]. Det teoretiske formelverket i kap. 4.4.8 blir kun presentert og forventes, slik beskrevet i forordet, at leser har forkunnskaper om. Hensikten med dette delkapittelet er å bruke det som en oversikt inn mot beregningene utført i kapittel 5.

Den totale kjøremotstanden, F_{total} (eller $F_{motst.}$) kan forstås som summen av fire motstandstyper (kjøremotstander):

$$F_{total} = F_A + F_S + F_L + F_R$$

- F_A , akselerasjonsmotstanden
- F_S , stigningsmotstanden
- F_L , luftmotstanden
- F_R , rulle­motstanden

Teoretisk formelverk kjøremotstander, tilgjengelig drivkraft og motormoment

$$F_{Hjul} = \frac{M_{motor} \cdot \eta \cdot i_{total}}{R} = F_R + F_S + F_A + F_L \quad (4.4)$$

F_{Hjul} : Skyvekraften på drivhjulene
 M_{Motor} : Motorens dreiemoment
 R : Hjulradien
 η : Drivverkets virkningsgrad
 i_{total} : Det totale utvekslingsforholdet mellom motor og drivhjul

$$P_{total} = (F_R + F_S + F_A + F_L) \cdot v \quad (4.5)$$

P_{total} : Nødvendig effektbehov ved drivhjulene
 v : Bilens hastighet

Luftmotstand, F_L

$$F_L = 0,5 \cdot C_W \cdot A \cdot \rho_{luft} \cdot (V_1 - V_0)^2 \quad , \text{ gjelder motvind} \quad (4.6)$$

$$F_L = 0,5 \cdot C_W \cdot A \cdot \rho_{luft} \cdot (V_1 + V_0)^2 \quad , \text{ gjelder medvind} \quad (4.7)$$

C_W : Luftmotstandskoeffisient
 A : Bilens tverrsnittareal (front)
 V_1 : bilens hastighet

V_0 : Vindhastighet
 ρ_{luft} : Luftens tetthet

$$A = X \cdot sporvidden \cdot kjoretøyets høyde \quad (4.8)$$

X: korreksjonsfaktor som korrigerer for hvor mye av arealet som «går bort». Faktoren "X" ligger mellom 0,86 og 0,94 [4].

Rullemotstand, F_R

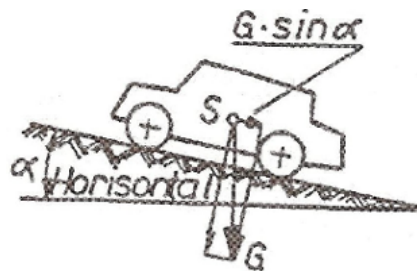
$$F_R = f \cdot G_{bil} = f \cdot m_{bil} \cdot g \quad (4.9)$$

G_{bil} : Tyngden (total bil)
 f: Rullemotstandskoeffisient
 m_{bil} : Masse av bil
 g: Tyngdeakselerasjon

Stigningsmotstand, F_S

$$F_S = G \cdot \sin \alpha = m_{bil} \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (4.10)$$

$$Stign(\%) = 100 \cdot \tan \alpha \quad (4.11)$$



Figur 4.34: Hjelpeillustrasjon til formelen for stigningsmotstand [4]

Akselerasjonsmotstand, F_A

$$F_A = a \cdot m_{ekv} = a \cdot \left(m_{bil} + \frac{I_{hj\ddot{u}l} + I_{me} \cdot i_d^2 + I_M \cdot i_{total}^2}{R^2} \right) \quad (4.12)$$

Hvor [4]:

a: akselerasjon

m_{ekv} : den ekvivalente massen (totale massen) til bilen når roterende masse omgjøres til translatorisk (lineær) beveget masse.

M_{bil} : bilens masse (kg)

$I_{hj\ddot{u}l}$: massetregghetsmomentet til hjul, nav og tilhørende aksler (kgm^2)

I_M : Massetregghetsmomentet til motor, svinghjul og inngående giraksel (kgm^2)

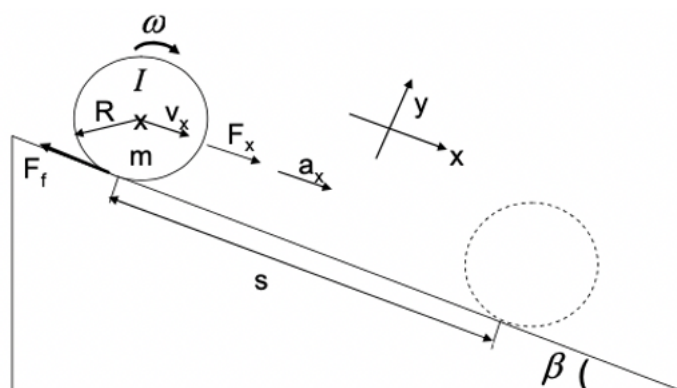
i_d : Utvekslingsforholdet til differensialen

I_{me} : Det totale utvekslingsforholdet mellom motor og drivhjul

R: Hjulradius

4.4.9. Estimeringsmetode treghetsmoment hjul

Ettersom treghetsmomentet til hjulet i Mirai 2 har vært en verdi som har vært vanskelig å fremskaffe er det gjort diverse estimeringsmetoder for å estimere denne verdien. Min veileder og førsteamanuensis ved NMBU, Geir Terjesen, sendte meg en estimeringsmetode [74] hvor prinsippet handler om at man improviserer et skråplan (en nedoverbakke, skaterampe eller liknende) som man kan finne vinkelen til. Dette enten ved hjelp av for eksempel en «vater-applikasjon» på smarttelefon som beregner vinkelen, eller ved hjelp av trigonometri. Utledningen kan sees i vedlegg [V6]



Figur 4.35: Hjelpefigur for estimering av treghetsmoment hjul

Testen utføres ved å slippe et hjul fra et startpunkt, la den rulle nedover skråplanet en kjent strekning (s) og måle tiden den bruker når den har nådd slutt punktet

Formlene som blir brukt for å beregne treghetsmomentet er:

$$a_x = \frac{2s}{t^2} \quad (4.13)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\text{motstående katet}}{\text{hosliggende katet}} \right) \quad (4.14)$$

$$I = mR^2 \left(\frac{g \cdot \sin \beta}{a_x} - 1 \right) \quad (4.15)$$

- a_x : hjulsenterets akselerasjon i x-retning [m/s^2]
- t: tiden [s] hjulet bruker på å rulle ned avstanden «s»
- β : skråplanets vinkel [$^\circ$]
- m: hjulets masse [kg]
- I: hjulets massetregghetsmoment [kgm^2]
- R: hjulradius [m]
- g: tyngdens akselerasjon [m/s^2]

4.4.10. Estimeringsmetode Luftmotstandskoeffisient

Vi kan estimere luftmotstandskoeffisienten ved å gjennomføre en test på en horisontal vei med bilen. Fremgangsmåten er hentet fra [11] og gjengis følgende:

1. Ved en gitt hastighet, sett giraksen i fri og la bilen rulle uten motorkraft
2. Mål retardasjonstiden for V_{a1} til V_{a2} (punkt a) og fra V_{b1} til V_{b2} (punkt b).
 - Disse to retardasjonstidene benevnes henholdsvis t_a og t_b .

Videre presenteres formelverket for beregning av luftmotstandskoeffisienten, C_w :

$$C_w = \frac{m_{bil}(a_a - a_b)}{\frac{\rho_{luft} \cdot A(v_a^2 - v_b^2)}{2}} \quad (4.16)$$

$$a_a = \frac{v_{a1} - v_{a2}}{t_a}, \quad a_b = \frac{v_{b1} - v_{b2}}{t_b} \quad (4.17)$$

$$v_a = \frac{v_{a1} + v_{a2}}{2}, \quad v_b = \frac{v_{b1} + v_{b2}}{2} \quad (4.18)$$

m_{bil} : Massen av bilen

a: gjennomsnittlig retardasjon ved a, henholdsvis b

v: Gjennomsnittlig hastighet ved a, henholdsvis b

ρ_{luft} : Tetthet av luft

A: Bilens tverrsnittareal

4.4.11. Estimeringsmetode Rullemotstandskoeffisient

Vi kan estimere rullemotstandskoeffisienten ved å gjennomføre nøyaktig den samme testen som vi gjorde i testen for estimering av luftmotstandskoeffisienten. Fremgangsmåten i testen er presentert i [11] og gjengis - på nytt - følgende:

1. Ved en gitt hastighet, sett giraksen i fri og la bilen rulle uten motorkraft
2. Mål retardasjonstiden for V_{a1} til V_{a2} (punkt a) og fra V_{b1} til V_{b2} (punkt b).
 - Disse to retardasjonstidene benevnes henholdsvis t_a og t_b .

Videre presenteres formelverket for beregning av rullemotstandskoeffisienten, f :

$$f = \frac{a_a \cdot v_b^2 - a_b \cdot v_a^2}{g(v_b^2 - v_a^2)} \quad (4.19)$$

For å finne verdiene: a_a , a_b , v_a og v_b , så henviser jeg til formlene (4.17) og (4.18) i kapittel 4.4.10 over.

m_{bil} : Massen av bilen

a: gjennomsnittlig retardasjon ved a, henholdsvis b

v: Gjennomsnittlig hastighet ved a, henholdsvis b

g: Tyngdens akselerasjon ($9,81 \text{ m/s}^2$)

5. RESULTATER

Hensikten med dette kapittelet er å undersøke hvordan teori og virkelighet samsvarer ved utregning av teoretiske og praktiske beregninger. Videre er hensikten med dette kapittelet også at leser kan benytte oppgavene/eksemplene som inspirasjon ved gjennomføring av egne drivverk- og drivkraftberegninger, og skape en diskusjon rundt usikkerheten og forbedringspotensialer ved resultatene.

5.1. Teoretiske beregninger

Hensikten med å gjennomføre teoretiske beregninger er å benytte oppgitt teoretiske formelverket å utføre drivverk- og drivkraftberegninger av brenselcellebiler, med utgangspunkt i Toyota Mirai. Det utvikles estimerte moment-, effekt- og drivkraftdiagrammer for Mirai 2 som for eksempel vil kunne bidra til å forstå Mirai 2 sine kjøreegenskaper.

- For å sammenlikne svarene opp mot andre verdier, benyttes prosentvik avvik. Dette forventes det at leser vet hva er og er i stand til å beregne. Utregninger av prosentvist avvik vil ikke vises i oppgavene, og svaret (det prosentvise avviket) oppgis i prosent.
- En liste over flere av verdiene brukt i oppgavene, samt hvor disse verdiene er fremskaffet, kan sees i vedlegg [V5].

Opgave 5.1. Regn ut en estimert teoretisk verdi for tverrsnitt-/frontarealet til Mirai 2.

- Tverrsnittarealet, A , er data det har vært utfordrende å framskaffe og det brukes derfor formel (3.6) som et forenklet estimat for denne verdien.

$$X = 0,86 \text{ [4]}$$

$$\text{Sporvidden} = 1610 + (1885-1610)/2 = 1747,5 \text{ mm [3]}$$

$$\text{Kjøretøyets høyde} = 1470 \text{ mm i [3]}$$

$$A = X \cdot \text{sporvidde} \cdot \text{kjøretøyets høyde}$$

$$A = 0,86 \cdot 1,7475\text{m} \cdot 1,470\text{m}$$

$$A = 2,21 \text{ m}^2$$

Oppg. 5.2. Estimert massetrehetsmoment hjul, metode nr. 1: «sylindrisk skall»

Ettersom det har vist seg å være utfordrende å få verdien for massetrehetsmoment til hjulet i Mirai 2, så er det ønskelig å benytte diverse teori for å finne en estimert verdi for treghetsmomentet til hjulet i Mirai 2. I oppgave 5.2 og 5.3 benyttes to diverse fremgangsmåter.

Regn ut treghetsmomentet til hjulet til Mirai 2 når følgende data om hjulet er oppgitt:

- $m = 30,1$ kg
- $R = 0,30$ m (middelradiusen ut til midten av ringen).

Benytter formel 7 i tabellen under for å estimere massetrehetsmomentet til hjulet til Toyota Mirai ved å anta at hjulet kan betraktes som en tynn ring/«sylindrisk skall»:

Tabell 5.1: Liste over diverse massetrehetsmomenter for ulike former/geometrier [75].

6	Tynn skive		$I_X = I_Y = \frac{mr_a^2}{4}$ $I_Z = \frac{mr_a^2}{2}$
7	Tynn ring		$I_X = I_Y = \frac{mr_m^2}{2}$ $I_Z = mr_m^2$

Trehetsmomentet for ett hjul estimeres med likningen fra rad 7 i tabellutraget over:

$$I_{Ett-Hjul} = I_Z = m \cdot r_m^2 \quad (4.20)$$

$$I_{Ett-Hjul} = 30,1 \cdot 0,30^2 = 2,71 \text{ kgm}^2$$



Oppg. 5.3. Estimert massetregghetsmoment hjul, metode nr. 2: «Bob S´ formel»

I et fysikkforum skriver «Bob S» [51] at massetregghetsmomentet til ett hjul er omtrent:

$$I_{Ett-Hjul} = 0,8 \cdot m \cdot R^2 \quad (4.21)$$

Benytt formel (4.21) og sammenlikn hvordan den stemmer med massetregghetsmomentet i oppgave 5.1 som estimerer et massetregghetsmoment på $2,71 \text{ kgm}^2$ for hjulet til Mirai 2.

$$I_{Ett-Hjul} = 0,8 \cdot m \cdot R^2$$

Regn ut tregghetsmomentet til hjulet til Mirai 2 når følgende data om hjulet er oppgitt:

- $m = 30,1 \text{ kg}$
- $R = 0,34 \text{ m}$

$$I_{Ett-Hjul} = 0,8 \cdot 30,1 \cdot 0,34^2$$

$$I_{Ett-Hjul} = 2,78 \text{ kgm}^2$$

Vi ser at dette stemmer relativt bra med verdien for det estimerte massetregghetsmoment funnet i oppgaven over, hvor det prosentvise avviket sammenlignet med oppgaven 5.2 er på ca. 2,6%.

Oppg. 5.4.

Regn ut luftmotstanden, F_L , for en Mirai 2 som kjører i 50 km/t.

- Luftmotstandskoeffisienten, $C_w = 0,29$ [5]
- Antar at det er vindstille, $V_0 = 0$
- Luftens tetthet, $\rho_{luft} = 1,225 \text{ kg/m}^3$ [6]
- Bilens hastighet i dette eksempelet settes, $V_1 = 50 \text{ km/t}$.
- Tverrsnittarealet, $A = 2,21 \text{ m}^2$

$$F_L = 0,5 \cdot C_w \cdot A \cdot \rho_{luft} \cdot (V_1 - V_0)^2$$

$$F_L = 0,5 \cdot 0,29 \cdot 2,21 \text{ m}^2 \cdot 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(\frac{50 \text{ m}}{3,6 \text{ s}} - 0 \right)^2$$

$$F_L = 75,7 \text{ N}$$

Oppg. 5.5:

- Verdier hentet fra [13]

- a) Regn ut utvekslingsforholdene i tannhjulparene for reduksjonsgiret når antallet tenner i på det drivende tannhjul er 15, og antall tenner i drevet tannhjul er 49.

- Z_1 : antall tenner på drivende tannhjul
- Z_2 : antall tenner på drevet tannhjul

$$i_{\text{reduksjonsgir}} = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{49}{15} = 3,267$$

- b) Regn ut utvekslingsforholdene i tannhjulparene for differensialen når antallet tenner i på det drivende tannhjul er 19, og antall tenner i drevet tannhjul er 68.

$$i_d = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{68}{19} = 3,579$$

- c) Regn ut det totale utvekslingsforholdet. Samsvarer dette med den oppgitte verdien på det totale utvekslingsforholdet, $i_{\text{total}} = 11,691$, som man kan finne på nett?

$$i_{\text{total}} = \frac{\text{produkt av drevne } (Z)}{\text{produkt av drivende } (Z)} = \frac{49}{15} \cdot \frac{68}{19} = 11,691$$

Utvekslingsforholdet oppgitt stemmer helt identisk med den oppgitte verdien 11,691.

Oppg. 5.6:

Det har vært vanskelig å fremskaffe informasjon om hvordan momentdiagrammet til den elektriske motoren i Mirai 2 ser ut slik produsenten har laget den, på grunn av konfidensialitet. Følgelig skal man i denne oppgaven: beregne og tegne en momentkurve for Mirai 2, basert på tabellverdier, samt kunnskaper og erfaring med hvordan momentkurver kan se ut for elektriske motorer.

- Verdiene som brukes er hentet fra [14].

1. Starter med å tegne et koordinatsystem med Dreiemoment (Nm) langs Y-aksen og Turtall (RPM) langs X-aksen. lilla kurve = dreiemoment og rød kurve = effekt.
2. Basert på litteraturen er trenden for momentkurver for elektriske motorer at de har et konstant maksmoment fra og med turtall 0 RPM fram til et visst antall RPM. Maks moment for Mirai 2 er oppgitt som 300Nm ved 3267 RPM.
3. Beregner effektkurven fram til 3267 RPM. Tar utgangspunkt i formelen under og antar konstant moment = 300 Nm, mellom 0 og 3267 RPM:

$$P = M \cdot \omega = M \cdot \frac{2\pi \cdot n_M}{60} \quad (4.22)$$

P: Motoreffekten (kW)

M: Motorens dreiemoment

n_M : Motorturtall (RPM)

$$P = 300 \cdot \frac{2\pi \cdot 3267}{60} = 102,6 \text{ kW}$$

4. Deretter faller momentkurven, mens effektkurven fortsetter å stige fram til maks effekt, $P_{\text{maks}} = 134 \text{ kW}$, hvilket er oppgitt å være ved 6940 RPM.
5. Bruker formelen fra punkt 3 til å beregne dreiemomentet ved maks effekt:

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P \cdot 60}{2\pi \cdot n_M} = \frac{134000 \cdot 60}{2\pi \cdot 6940}$$

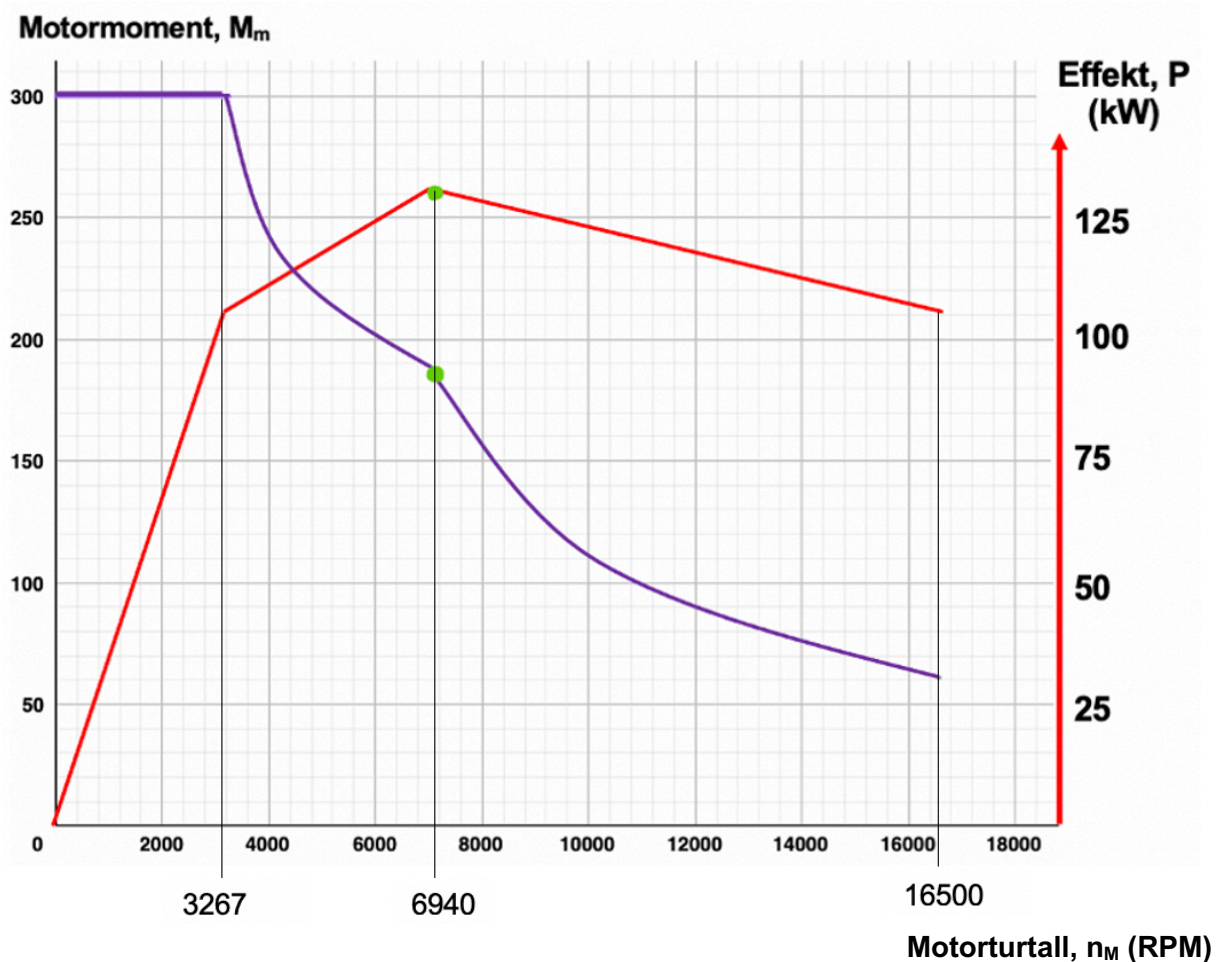
$$M = \frac{134000 \cdot 60}{2\pi \cdot 6940} = 184,4 \text{ Nm}$$

7. De motordiagrammene jeg har funnet antar konstant effekt i deler av området når momentkurven faller. Derfor gjør jeg den antagelsen at ved maks turtall, så faller effektkurven tilbake til effekten ved maksmoment = 300 Nm og 3267 RPM.

8. Ved maks turtall ($n_M = 16500 \text{ RPM}$ [V2]) beregnes dreiemomentet ved antakelsen om at effekten har falt tilbake til effektverdien ved turtall = 3267 RPM, altså $P = 102,64 \text{ kW}$. Dette gir dreiemomentet:

$$M = \frac{102640 \cdot 60}{2\pi \cdot 16500} = 59,4 \text{ Nm}$$

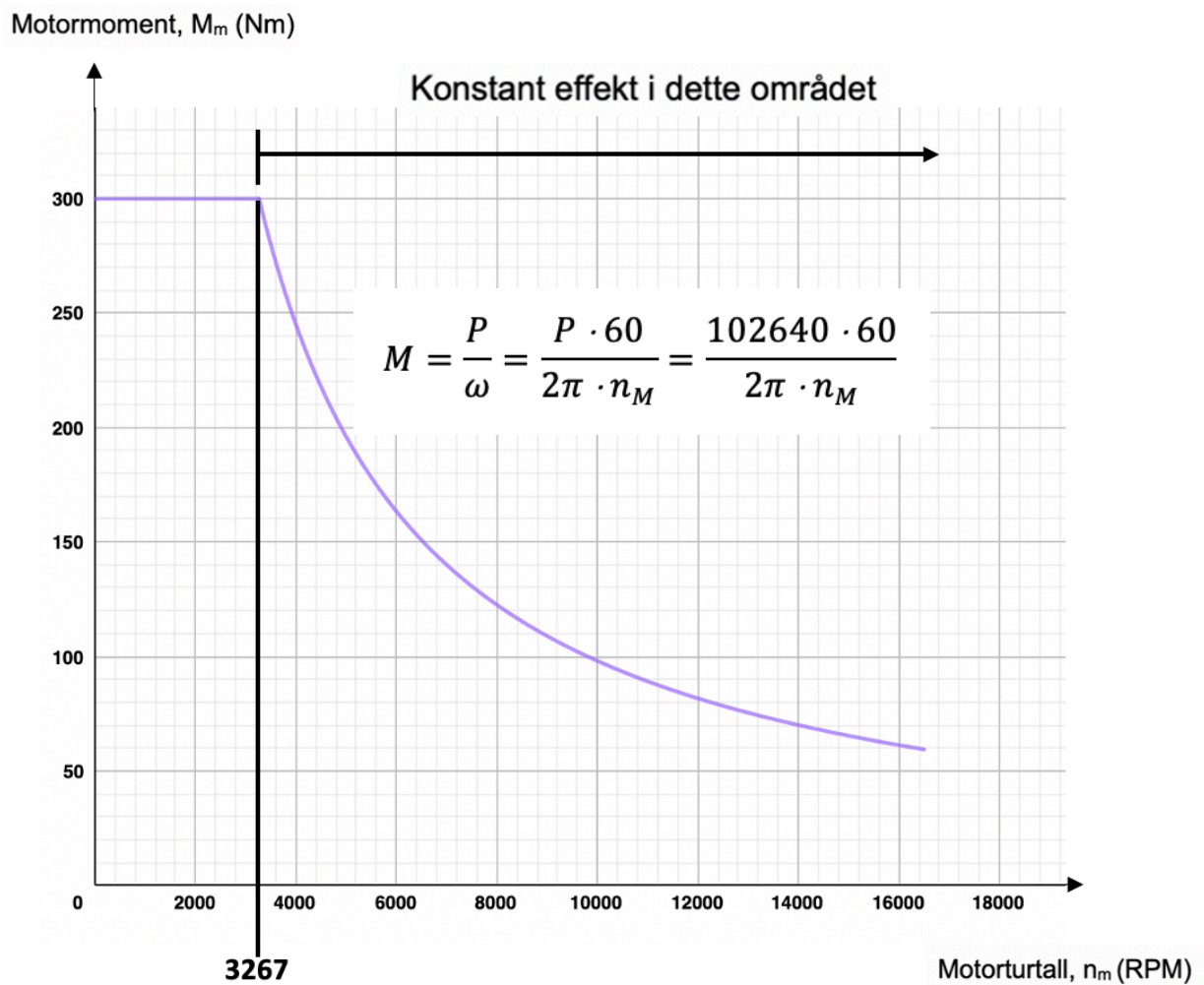
En foreløpig momentkurve med 2 «svaier»; den første mellom 3267 til 6940 RPM og den andre mellom 6940 og 16 500 RPM vil kunne se omtrent slik ut:



Figur 5.1. Estimert moment- og effektkurve for Mirai 2, med 2 «svaier»

9. Som skrevet i punkt nr. 7, er det funnet motordiagrammer som antar konstant effekt i deler av området når momentdiagrammet faller. Derfor gjør jeg den antakelsen at når momentdiagrammet har passert turtallsområdet med konstant maksimummoment = 300 Nm, så antar jeg en konstant effekt lik verdien 102,64 kW i hele turtallsområdet fra 3267 RPM til 16500 RPM (maks turtall).

Følgelig vil den endelige estimerte momentkurven, som vil bli brukt i videre regneoppgaver, se slik ut:



Figur 5.2. Estimert moment- og effektkurve for Mirai 2, med én «svai» hvor det antas konstant effekt etter 3267 RPM



Oppg. 5.7:

I følge [62] er topphastigheten til Mirai 2. generasjon 175 km/t. Benytt formelen under (skriv formelen inn i teorikapittelet og omformuler oppgaveteksten) og sammenlikn hvordan den oppgitte topphastigheten passer med det teoretiske formelverket

$$V = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \frac{n_M}{60}}{i_{total}} \quad (4.23)$$

V: Bilens hastighet

R: Hjulradius = 0,34 m

n_M : Motorturtall = 16500 RPM

i_{total} : totalt utvekslingsforhold = 11,691

$$V = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,34 \cdot \left(\frac{16500}{60}\right)}{11,691} = 50,225 \frac{m}{s} = 180,8 \frac{km}{t}$$

Dette er noe prosentvis avvikende (3,3%) fra 175 km/t, men ettersom hjulradius ble målt fysisk, så ville en hjulradius på 1 cm mindre, altså 0,33 meter gitt $V = 175,5$ km/t. Derfor stemmer teorien bra med den oppgitte topphastigheten.



Oppg. 5.8:

Motoren til Toyota leverer 175 hestekrefter (hk) i følge [26], og den leverer 182 hk ifølge [27]. Benytt formel (4.24) under [25] til å undersøke hestekreftene til Mirai 2 ved maks dreiemoment og ved maks effekt. Kommenter hvordan beregnede verdier passer med de oppgitte hestekreftene. Verdiene som benyttes underveis er hentet fra [14] (se [V2]).

Motoreffekten i hestekrefter, P_{hk} , er gitt ved følgende formel:

$$P_{hk} = \frac{T_{Nm} \cdot N_{rpm}}{7127} \quad (4.24)$$

Hvor:

P_{hk} : Motoreffekten i hestekrefter (hk)

T_{Nm} : Motormomentet (Nm)

N_{rpm} : Motorturtall (RPM)

- Divisoren (nevneren) = 7127 er en konverteringsfaktor.

Motoreffekten i hestekrefter ved maksimummoment ($T_{Nm} = 300 \text{ Nm}$, $N_{rpm} = 3267 \text{ RPM}$):

$$P_{hk} = \frac{300 \cdot 3267}{7127} = 137,5 \text{ hk}$$

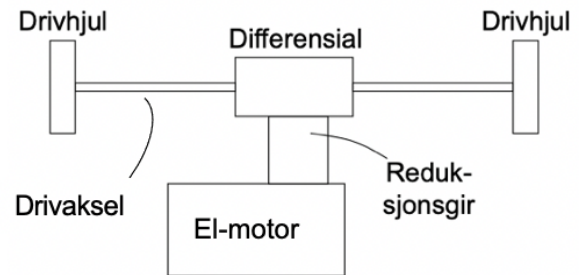
Motoreffekten i hestekrefter ved maks effekt ($T_{Nm} = 184,4 \text{ Nm}$, $N_{rpm} = 6940 \text{ RPM}$):

$$P_{hk} = \frac{184,4 \cdot 6940}{7127} = 179,6 \text{ hk}$$

Vi ser at det oppgitte antallet hestekrefter ligger relativt nærme begge de oppgitte verdiene på hhv. 175 hk og 182 hk, og at bilen yter dette antallet hestekrefter ved oppgitt maks effekt = 134 kW [V2]

Oppg. 5.9.

Momentkurven til den bakhjulsdrevne hydrogenbilen Mirai 2, bestående av EI-motor, ble estimert i oppgave 5.6 og er presentert under. Prinsippet til motor og drivverk er vist i figur 5.3.

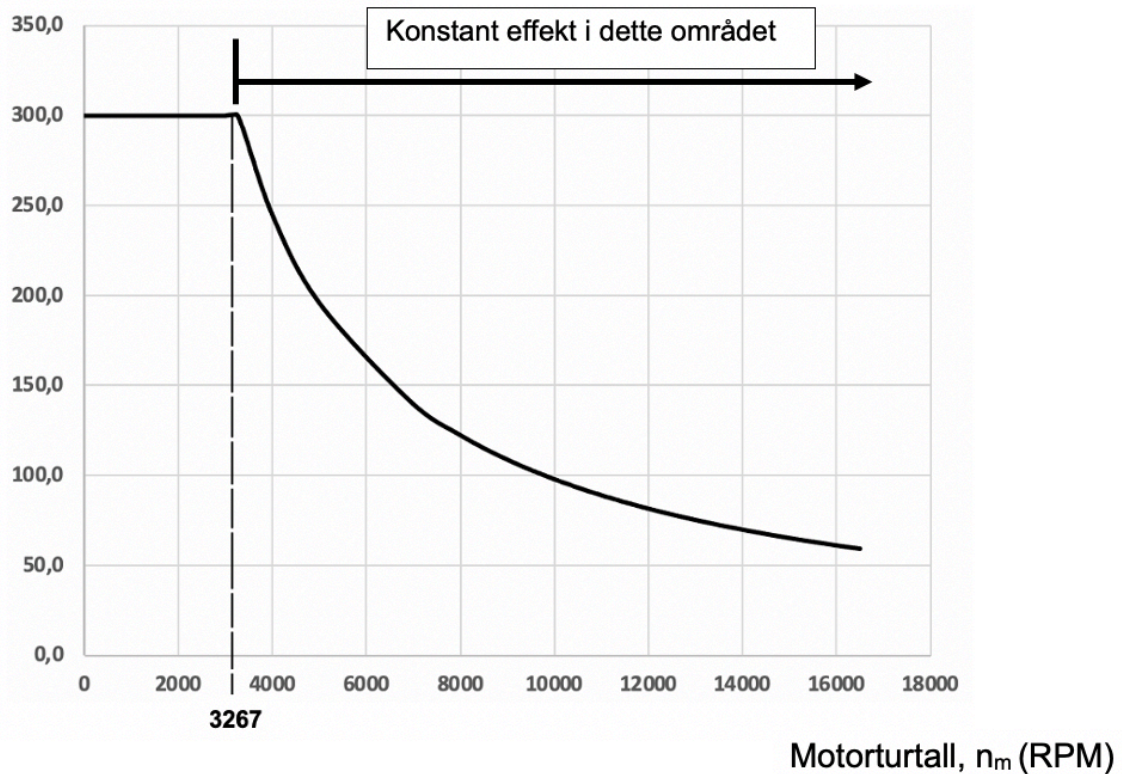


Figur 5.3: Drivverk Mirai 2

Følgende data gis:

- Bilens aktuelle vekt, $m_{bil} = 2000$ kg
- Hjulradius $R = 0,34$ m
- Rullemotstandskoeffisienten, $f = 0,0076$.
- Luftmotstandskoeffisient, $C_w = 0,29$
- Lufttettheten $\rho_{Luft} = 1,25$ kg/m³
- Tverrsnittarealet, $A = 2,21$ m²
- Totalt utvekslingsforhold mellom EI-motor og drivhjul, $i_{total} = 11,691$.
- Total virkningsgraden til drivverket settes konstant til $\eta = 0,97$ [38]
- Motorens massetregghetsmoment er $I_M = 0,1$ kgm² [38]
- Massetregghetsmomentet til reduksjonsgir, differensial og hjul henregnet til drivhjulene er $I_{hjul} = 11,3$ kgm².
- I beregningene antar vi at det er vindstille.

Motormoment, M_m (Nm)



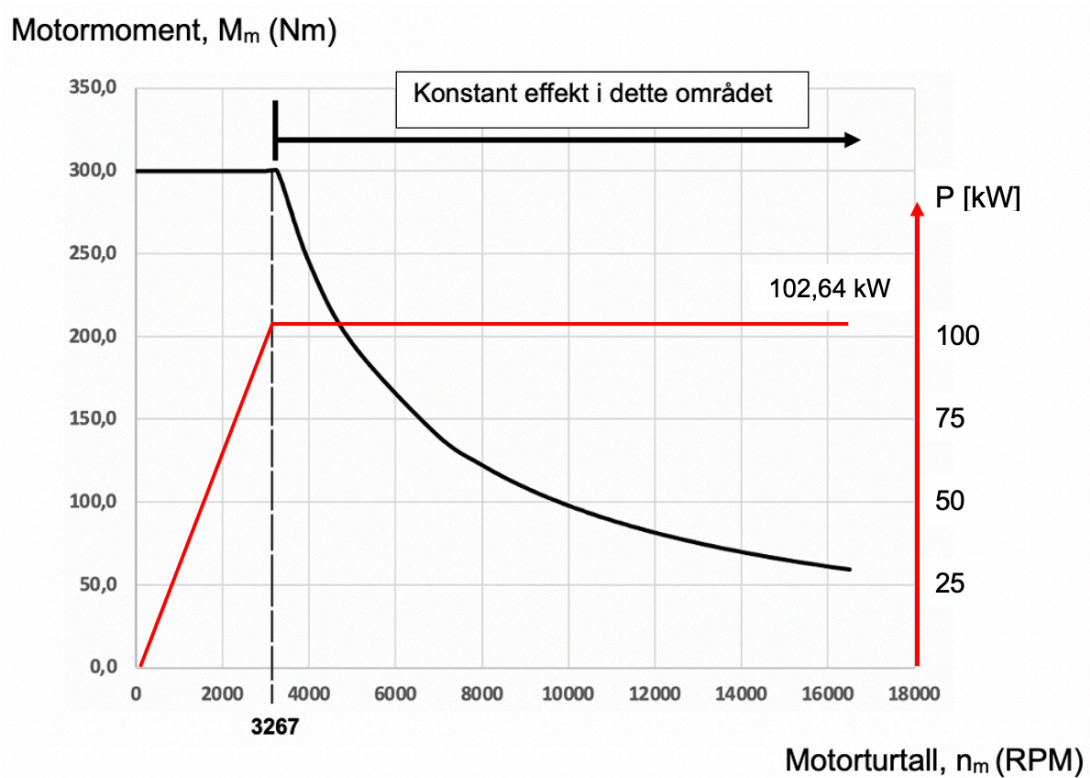
Figur 5.4. Momentdiagram Mirai 2

a) Skisser effektkurven og regn ut maks effekt når vi antar konstant effekt fra turtallsområdet 3267 RPM til maks turtall 16500 RPM.

I turtallsområdet 0 - 3267 RPM er momentet konstant 300 Nm og effektkurven vil stige lineært fram til 3267 RPM og deretter holde seg konstant på denne verdien fram til 16500 RPM.

$$P = \frac{M \cdot \pi \cdot n}{30} = \frac{300 \cdot \pi \cdot 3267}{30} \cdot 10^{-3} = 102,64 \text{ kW}$$

Den røde kurven i figuren under skisserer effektkurven.



Figur 5.5. Moment- og effektdiagram Mirai 2



b) Tegn drivkraftkurven til hydrogenbilen

- Motorturtall: n_m [RPM]

$$F_{hjul} = \frac{M_{motor} \cdot \eta \cdot i_{total}}{R} = \frac{300 \cdot 0,97 \cdot 11,691}{0,34} = 10006,1 \text{ N}$$

$$v(n_m) = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot n_m}{i_{total} \cdot 60}$$

Vi finner ut av hva den translatoriske hastigheten til hjulene er ved maks moment når turtallet er 3267 rpm (rpm kan også benevnes omdreining/min = o/min)

$$v(3267) = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,34 \cdot 3267}{11,691 \cdot 60} = 9,95 \text{ m/s}$$

$$v = 9,95 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{3600\text{s}}{\text{t}} \cdot \frac{\text{km}}{1000} = 14,22 \frac{\text{km}}{\text{t}} = 35,8 \text{ km/t}$$

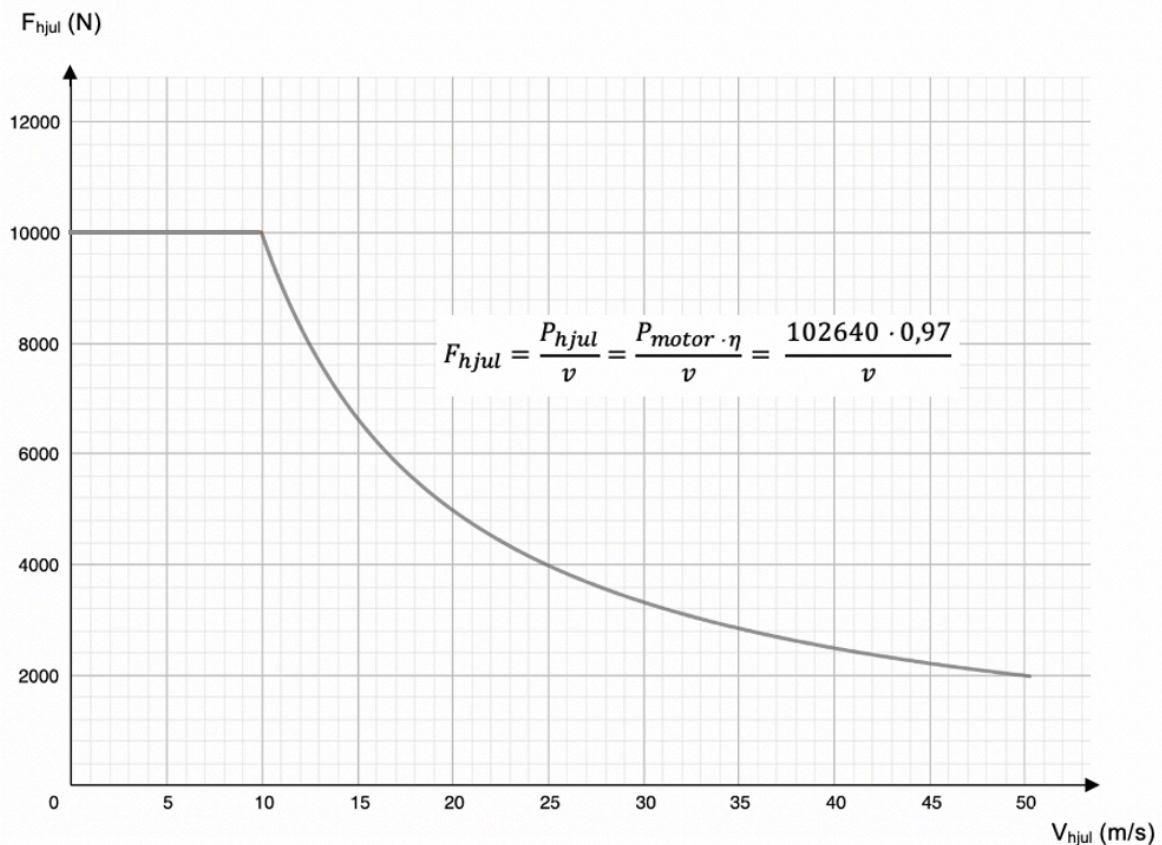
Fra 0 til 3267 rpm er motormomentet konstant $M_{motor} = 300 \text{ Nm}$ og ved hjelp av formelen under beregner vi drivkraften tilgjengelig på hjulene, F_{hjul} :

$$F_{hjul} = \frac{M_{motor} \cdot \eta \cdot i_{total}}{R} = \frac{300 \cdot 0,97 \cdot 11,691}{0,34} = 10006,1 \text{ N}$$

Drivkraftkurven fra og med 9,95 m/s vil følge funksjonen basert på formelen under, fram til maks hastighet som er ved ca. 50 m/s.

$$F_{hjul} = \frac{P_{hjul}}{v} = \frac{P_{motor} \cdot \eta}{v} = \frac{102640 \cdot 0,97}{v} = \frac{99560,8}{v}$$

Under vises den endelige drivkraftkurven og formelen i figuren F_{hjul} viser hvordan kurven vil utvikle seg fra og med 9,95 m/s. V_{hjul} er bilens hastighet.



Figur 5.6. Estimert drivkraftkurve for Mirai 2

c) Som bilpendler må mellom Drammen og Ås må jeg kjøre gjennom Oslofjordtunnelen hvor fartsgrensen er 70 km/t og maks stigning er 7%. Regn ut den største hastigheten hydrogenbilen kan komme opp i ved kjøring i denne stigningen.

- Akselerasjonsmotstanden settes lik 0 da det antas kjøring ved konstant hastighet.
- Summen av motstandskreftene settes lik rulle-, luft- og stigningsmotstanden:

$$F_{mots.} = F_R + F_L + F_S$$



Rullemotstand:

$$F_R = f \cdot G_{bil} = f \cdot m_{bil} \cdot g$$

$$F_R = 0,0076 \cdot 2000 \cdot 9,81 = 149,1 \text{ N}$$

Luftmotstand:

$$F_L = 0,5 \cdot C_W \cdot A \cdot \rho_{luft} \cdot (V_1 - V_0)^2$$

$$F_L = 0,5 \cdot 0,29 \cdot 2,21 \cdot 1,25 \cdot V_1^2 = 0,4V_1^2$$

Stigningsmotstand:

Ved 7% stigning beregnes vinkelen i grader med formelen under:

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

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{7}{100}\right) = 4,00^\circ$$

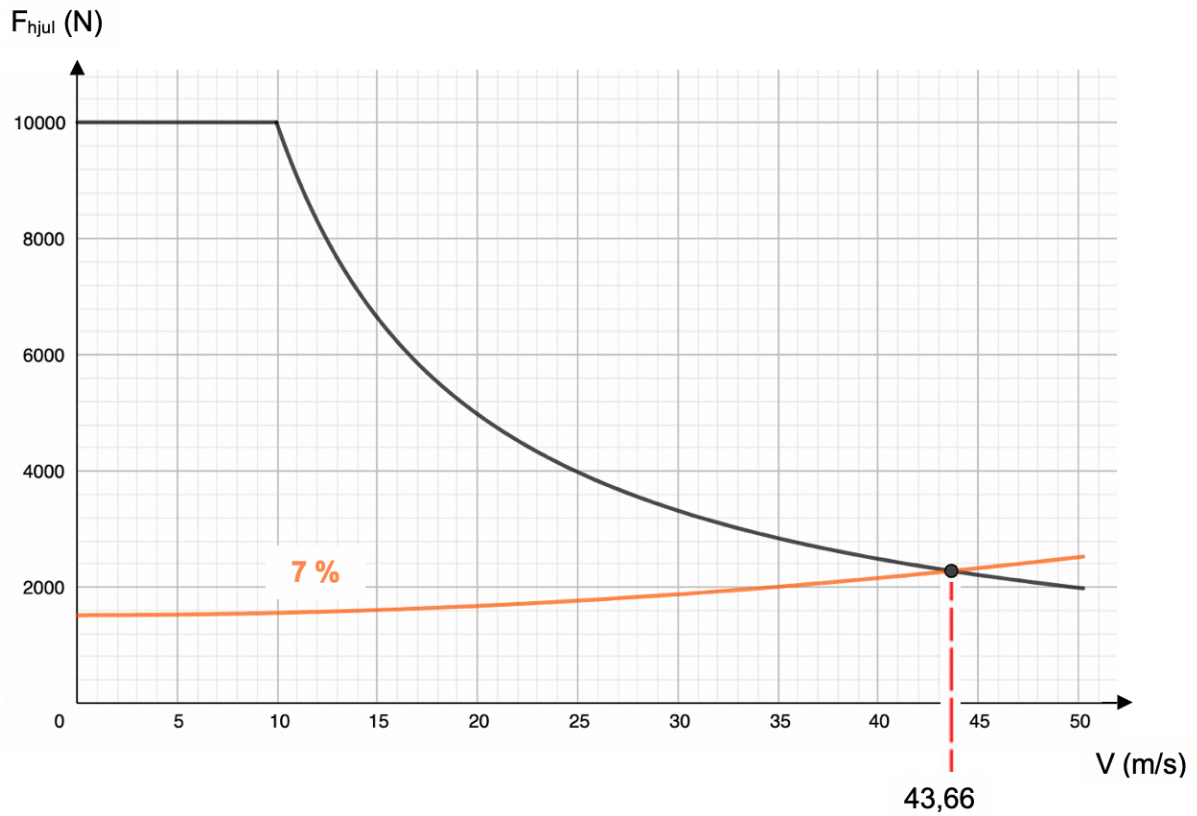
$$F_S = G \cdot \sin \alpha = m \cdot g \cdot \sin \alpha$$

$$F_S = 2000 \cdot 9,81 \cdot \sin(4,00^\circ) = 1368,6 \text{ N}$$

Den samlede totale motstandskraften:

$$F_{mots.} = 149,1 + 0,4V_1^2 + 1368,6 = 1517,7 + 0,4V_1^2$$

Vi legger inn den samlede totale motstandskraften ved 7% stigning (den oransje kurven i figuren under) i drivkraftdiagrammet og finner skjæringspunktet med drivkraftkurven.

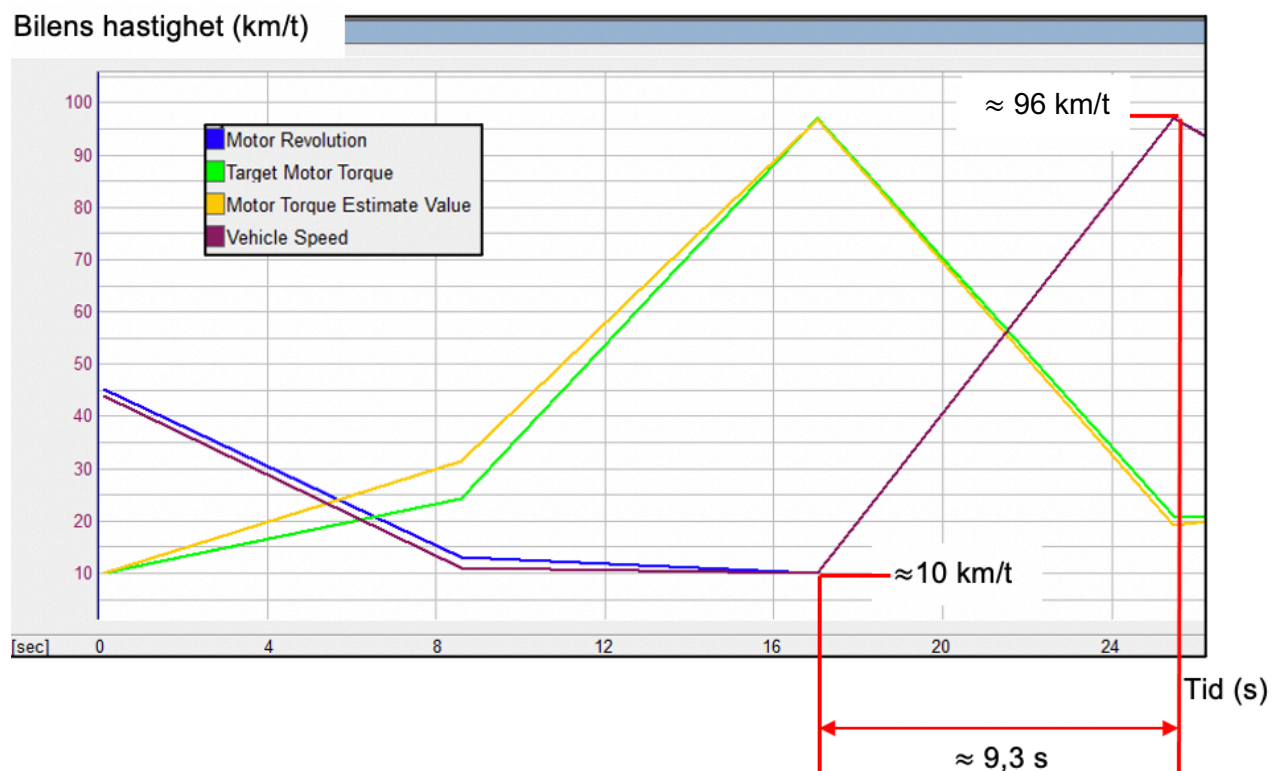


Figur 5.7. Estimert drivkraftkurve for Mirai 2, med

Den største hastigheten som kan oppnås ved 7% stigning inne på Oslofjordtunellen for denne hydrogenbilen er i følge figuren over $43,66 \text{ m/s} = 43,66 \cdot 3,6 = 157,2 \text{ km/t}$.

d) Ved testkjøring av hydrogenbilen Mirai 2 med programvaren GTS koblet til bilen, produseres hastighetskurver. Den lilla kurven viser fra ca. 8 sekunder en konstant hastighet på bilen som er omtrent 10 km/t. Deretter trækker sjåføren ned gasspedalen til det maksimale og bilen bruker deretter ca. 9,3 sekunder på å akselerere fra 10 km/t til 96 km/t. Undersøk om dette stemmer i forhold til momentkurven presentert i oppgave b).

- Antar horisontal kjøring $\rightarrow F_s = 0 \text{ N}$
- Innledningsvis skrev jeg at massetregghetsmomentet til reduksjonsgir, differensial og hjul henregnet til drivhjulene er $I_{\text{hjul}} = 11,3 \text{ kgm}^2$. Denne verdien er basert på estimeringen av det praktisk-estimerte tregghetsmomentet til hjulet til Mirai 2, som er beregnet i kapittel 5.2.1. Av de tre estimerte verdiene (beregnet i denne masteroppgaven) for tregghetsmomentet til Mirai 2 sitt hjul, har jeg valgt den største verdien, og multipliserer i tillegg denne verdien med en estimeringsfaktor på 1,15 (15% økning) i beregningene under. Grunnen til dette er for å ivareta tregghetsbidraget fra andre roterende deler relatert til hjulet. Dette kan i biler - på et generelt - grunnlag (uavhengig av at vi fokuserer på brenselcellebiler i denne oppgaven) være massetregghetsmomenter fra nav, bremsdrivaksler, solhjul osv.



Figur 5.8: Hastighetskurve produsert ved fysisk testkjøring av Mirai 2

Figuren over viser hastighetskurven utviklet ved fysisk test av Mirai 2. De røde strekene i figur 5.8 er hjelpelinjer som viser at ved fullt gasspådrag så brukte Mirai 2 ved utførelsen av den fysiske testkjøringen omtrent 9,3 sekunder på å akselerere fra 10 km/t til 96 km/t. Herved benevnes denne tiden: aksellerasjonstiden ved fysisk test = 9,3 sekunder.



Rullemotstand:

$$F_R = f \cdot G_{bil} = f \cdot m_{bil} \cdot g$$

$$F_R = 0,0076 \cdot 2100 \cdot 9,81 = 156,6 \text{ N}$$

Luftmotstand:

$$F_L = 0,5 \cdot C_W \cdot A \cdot \rho_{luft} \cdot (V_1 - V_0)^2$$

$$F_L = 0,5 \cdot 0,29 \cdot 2,21 \cdot 1,25 \cdot V_1^2 = 0,4V_1^2$$

Den samlede totale motstandskraften:

$$F_{mots.} = 156,6 + 0,4V_1^2$$

Tabell 5.2: Relevante hastigheter konvertert til m/s

Starthastighet	Hastighet ved 3267 RPM	Slutthastighet ved 96 km/t
$\frac{10 \text{ km/t}}{3,6} = 2,8 \text{ m/s}$	9,95 m/s	$\frac{96 \text{ km/t}}{3,6} = 26,7 \text{ m/s}$

Akselerasjonsmotstanden:

- Bilens vekt inkludert vekten av 2 menn, $m_{bil} = 2100 \text{ kg}$.

$$m_{ekv} = m_{bil} + \frac{I_{hjul} + I_{me} \cdot i_d^2 + I_M \cdot i_{total}^2}{R^2}$$

$$m_{ekv} = 2100 + \frac{11,3 \cdot 1,15 + 0,1 \cdot 11,691^2}{0,34^2} = 2331 \text{ kg}$$

$$F_a = a \cdot m_{ekv} = 2331a$$

Underveis kommentar:

I brøken over faller « $I_{me} \cdot i_d$ » leddet bort fordi er regnet om til å være om motorens akse eller hjulene, hvilket betyr at de er ivaretatt av data i eksempelet.

Setter likningen for drivkraft tilgjengelig ut på hjulene lik summen av kjøremotstander i denne kjøretilstanden:

$$F_{hjul} = \frac{M_{motor} \cdot \eta \cdot i_{total}}{R} = F_R + F_S + F_A + F_L$$

Fra 2,8 til 9,95 m/s:

$$\frac{300 \cdot 0,97 \cdot 11,691}{0,34} = 156,6 + 0 + 2331a + 0,4V_1^2$$

$$2331a = \frac{300 \cdot 0,97 \cdot 11,691}{0,34} - 156,6 - 0,4V_1^2$$

$$2331a = \frac{300 \cdot 0,97 \cdot 11,691}{0,34} - 156,6 - 0,4V_1^2 \Rightarrow 2331a = 9849,5 - 0,4V_1^2$$

$$a = \frac{dV_1}{dt} = \frac{9849,5 - 0,4V_1^2}{2331} \Rightarrow dt = \frac{2331dV_1}{9849,5 - 0,4V_1^2} = \frac{5827,5dV_1}{156,92^2 - V_1^2}$$

$$t = 5827,5 \int_{2,8}^{9,95} \frac{dV_1}{156,92^2 - V_1^2} = \frac{5827,5}{2 \cdot 156,92} \left[\ln \left| \frac{9,95 + 156,92}{9,95 - 156,92} \right| - \ln \left| \frac{2,8 + 156,92}{2,8 - 156,92} \right| \right]$$

$$t = \frac{5827,5}{2 \cdot 156,92} [\ln(1,1354) - \ln(1,0363)] = 1,695 \text{ s}$$

Fra 9,95 til 26,7 m/s:

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

$$F_{hjul} = \frac{P_{hjul}}{V_1} = \frac{P_{motor} \cdot \eta}{V_1} = \frac{102640 \cdot 0,97}{V_1} = \frac{99560,8}{V_1}$$

$$\frac{99560,8}{V_1} = 156,6 + 0 + 2331a + 0,4V_1^2$$

$$2331a = \frac{99560,8}{V_1} - 156,6 - 0,4V_1^2 \Rightarrow a = \frac{99560,8}{2331V_1} - \frac{156,6}{2331} - \frac{0,4V_1^2}{2331}$$

$$a = \frac{99560,8}{2331V_1} - \frac{156,6V_1}{2331V_1} - \frac{0,4V_1^3}{2316V_1} \Rightarrow a = \frac{(99560,8 - 156,6V_1 - 0,4V_1^3)}{2331V_1}$$

$$a = \frac{dV_1}{dt} = \frac{(99560,8 - 156,6V_1 - 0,4V_1^3)}{2331V_1} \Rightarrow dt = \frac{dV_1 \cdot 2331V_1}{(99560,8 - 156,6V_1 - 0,4V_1^3)}$$



Benytter Wolfram Alpha til å regne ut integralet:

$$t = 2331 \int_{9,95}^{26,7} \frac{V_1 \cdot dV_1}{(99560,8 - 156,6V_1 - 0,4V_1^3)} = 7,702 \text{ s}$$

Total tid brukt til å akselerere bilen fra 10 km/t til 96 km/t:

$$\text{Total akselerasjonstid} = 1,695\text{s} + 7,702\text{s} \approx 9,4 \text{ s}$$

Det teoretiske tidsestimatet av akselerasjonstid fra 10 km/t til 96 km/t beregnet på bakgrunn av moment- og effektkurven laget i oppg. 5.9a), viser at det er et svært lite prosentvis avvik (1,1%) i forhold til akselerasjonstiden på 9,3 sekunder som er basert på den fysiske testkjøringen av basert på avlesningen av hastighetskurven til den fysiske testkjøringen av Mirai 2.

Kommentar:

I figur 5.8 ser vi en grønn og gul kurve, hhv. «Target Motor Torque» og «Motor Torque Estimate Value». I utgangspunktet, altså før testkjøring av Mirai 2, så tolket jeg at dette henholdsvis refererte til «motormomentet bilen ønsker å ha ved den aktuelle hastigheten» (grønn kurve) og det «estimerte motormomentet ved den aktuelle hastigheten» (gul kurve). På grunn av tolkningen beskrevet over, så trodde jeg at jeg ville kunne estimere og lage motorens momentkurve, ved fysisk kjøring av Mirai 2, ved hjelp av GTS-programvaren (beskrevet i kap. 3).

Dersom dette skulle være riktig, altså at «Target Motor Torque» og «Motor Torque Estimate Value» var de verdiene jeg ovenfor skrev at jeg på forhånd trodde de var, så vil dette si at de oppgitte tabellverdiene i [V2], som er utgitt av Toyota selv [14] og som har vært grunnlaget for utviklingen av momentkurve i figur 5.6, måtte ha vært helt feil.

Ettersom grunnlaget for beregningene i denne oppgaven har vært moment- og effektdiagrammet i figur 5.6, og at beregningene av akselerasjonstiden i denne oppgaven har samsvart så bra med hastighetskurven ved den fysiske testkjøringen (se figur 5.8), så vil en logiske forklaring være at at «Target Motor Torque» eller «Motor Torque Estimate Value» ikke kan være motorens dreiemoment, slik jeg først trodde. Dette er fordi den estimerte momentkurven i figur 5.6, er meget ulik «Target Motor Torque» og «Motor Torque Estimate Value» (grønn og gul kurve i figur 5.8).

5.2. Beregninger praktiske tester

Hensikten med de praktiske (eksperimentelle) testene er å fremskaffe teknisk data ved hjelp av estimeringsmetodene/ de praktiske testene presentert i kapittel 4.4.9 – 4.4.11.

5.2.1. Praktiske utførte beregninger Toyota Mirai 2

Eksempel 1. Regn ut treghetsmomentet til hjulene til Toyota Mirai ved hjelp av estimeringsmetoden oppgitt i kapittel 4.4.9 og kommenter hvordan dette stemmer med tidligere beregnede treghetsverdier for hjulet.

Utstysrliste:

- Målebånd/ tommestokk
- Baderomsvekt
- Kalkulator
- Blyant/penn
- Notatark
- Det aktuelle hjulet du skal finne massetreggheten til
- Stoppeklokke/smarttelefon
- Gaffatape

Figuren under viser utstyret benyttet i estimeringsmetoden. I tillegg til dette ble stoppeklokke og smarttelefon benyttet til tidtaking og filming av testen, samt gaffatape for markering av start- og slutt punkt.



Figur 5.9. Utstyr benyttet i oppgaven

Slik det framkom under utledningen av estimeringsmetoden, benyttes nedoverbakke/ skråplan til gjennomføring av testen. Jeg valgte å gjennomføre testen på skateparken i Drammen, da det er gunstig og forholdsvis enkelt å måle ulike lengder, samt finne vinkel på en lineærformet skaterampe. Figurene under viser skråplanet (skaterampen) benyttet i testen fra flere vinkler, og i det nederste bildet er vinkelen β tegnet inn med rødt.



Figur 5.10: viser skråplanet benyttet med gaffatape-markert start- og slutt punkt, samt vinkelen β til skråplanet.

- Strekingen, s måles til 2,55 m måles
- Tiden, t måles til 1,81 s
- (Benytter formelverket presentert i kapittel 4.4.9.)

$$a_x = \frac{2s}{t^2}$$

$$a_x = \frac{2 \cdot 2,55 \text{ m}}{(1,81 \text{ s})^2} = 1,5567 \text{ m/s}^2$$

- Massen til hjulet, m måles til 30,1 kg
- Radiusen fra bakken og til senter av hjulet måles til 0,34 m
- Tyngdeakselerasjonskonstanten, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

$$I = mR^2 \left(\frac{g \cdot \sin \beta}{a_x} - 1 \right)$$

Vi benytter trigonometri til å finne vinkelen til skråplanet (skaterampen i dette tilfellet):

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\text{motstående katet}}{\text{hosliggende katet}} \right)$$

- Jeg måler en valgt lengde langs den hosliggende kateten (se figur 5.10) og måler tilhørende høyde (motstående katet)
- Hosliggende katet = 1,0 m
- Motstående katet = 0,3 m

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{0,3 \text{ m}}{1,0 \text{ m}} \right)$$

$$\beta = 16,699^\circ$$

$$\beta \approx 16,7^\circ$$

Vi setter inn verdiene vi har målt og beregnet inn i funksjon (3.14):

$$I = (30,1 \text{ kg})(0,34 \text{ m})^2 \left(\frac{\left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \cdot \sin(16,7^\circ)}{1,5567 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} - 1 \right) = 2,8215 \text{ kgm}^2$$



Massetrehetsmomentet for 1 hjul er:

$$I_{\text{Ett-Hjul}} = 2,8215 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Massetrehetsmomentet for alle 4 hjul er:

$$I_{\text{hjul}} = 2,8215 \cdot 4 = 11,3 \text{ kgm}^2$$

Sluttkommentar:

- Verdien for ett hjul som er på $2,82 \text{ kgm}^2$ passer godt med «Bob's formel» som estimerte treghetsmomentet til å være $2,78 \text{ kgm}^2$ for ett hjul, som gir et relativt avvik på ca. 1,5%. Dette er både med på å verifisere at verdiene stemmer relativt bra ved at verdiene ligger så nære hverandre, samt at forsøket er gjennomført korrekt.
- Verdien for ett hjul ved hjelp av formelen for treghetsmoment til et sylindrisk skall/ tynn skive ga en massetregghet på $2,78 \text{ kgm}^2$, og det prosentvise avviket er kun 1,5 prosent.

Eksempel 2. Regn ut Luftmotstandskoeffisienten til Mirai ved hjelp av estimeringsmetoden oppgitt i kapittel 4.4.10.

- For å estimere luftmotstandskoeffisienten i eksempel 2, samt rullestandskoeffisienten i eksempel 3, gjennomføres testen forklart i kapittel 4.4.10 (forklares på nytt i kapittel 4.4.11) med tilhørende formelverk. Dataene/ resultatene fra testen, vil både kunne brukes til å estimere luft- og rullestandskoeffisienten.
- Den oppgitte luftmotstandskoeffisienten, C_w , til Mirai 2 er 0,29. Hensikten med denne testen er å sammenlikne verdien for luftmotstandskoeffisienten oppgitt og den som estimeres i denne testen.

Utstyrsliste:

- Stoppeklokke
- Penn/blyant
- Notatark
- Kalkulator
- Hjelpeperson til å registrere tider, slik at sjåfør kan fokusere på trafikken.

Antakelse:

- Massen av bil med fører, m , er mellom 1900 og 1950 kg («Curb weight») altså uten passasjer og bagasje [7]. Antar derfor en masse på bilen på 1925 kg + 2 passasjerer (sjåfør + hjelpeperson) ≈ 2100 kg.

Verdier:

- Tverrsnittareal/frontareal, $A = 2,21 \text{ m}^2$
- Tettheten av luft, $\rho_{\text{Luft}} = 1,225 \text{ kg/m}^3$ [6]
- Massen av bil med passasjerer, $m_{\text{bil}} = 2100 \text{ kg}$.
- $v_{a1} = 65 \text{ km/t}$
- $v_{a2} = 60 \text{ km/t}$
- $v_{b1} = 15 \text{ km/t}$
- $v_{b2} = 10 \text{ km/t}$
- $t_a = 6,87 \text{ s}$
- $t_b = 9,48 \text{ s}$

Konstanter:

- v : gjennomsnittlig hastighet ved a, henholdsvis b
- a : gjennomsnittlig retardasjon ved a, henholdsvis b
- t : tiden målt som bilen bruker på å retardere i nøytral-gir, i de to tidsintervallene fra $v_{a1} \rightarrow v_{a2}$ og $v_{b1} \rightarrow v_{b2}$

Retardasjonen ved a, a_a :

$$a_a = \frac{v_{a1} - v_{a2}}{t_a} = \frac{\left(\frac{65}{3,6} - \frac{60}{3,6}\right)}{6,87} = 0,20217 \text{ m/s}^2$$

Retardasjonen ved b, a_b :

$$a_b = \frac{v_{b1} - v_{b2}}{t_b} = \frac{\left(\frac{15}{3,6} - \frac{10}{3,6}\right)}{9,48} = 0,14651 \text{ m/s}^2$$

Gjennomsnittshastigheten ved a:

$$v_a = \frac{v_{a1} + v_{a2}}{2} = \frac{\left(\frac{65}{3,6} + \frac{60}{3,6}\right)}{2} = 17,36 \text{ m/s}$$

Gjennomsnittshastigheten ved b:

$$v_b = \frac{v_{b1} + v_{b2}}{2} = \frac{\left(\frac{15}{3,6} + \frac{10}{3,6}\right)}{2} = 3,472 \text{ m/s}$$

Luftmotstandskoeffisient, C_w :

$$C_w = \frac{m_{bit}(a_a - a_b)}{\frac{\rho_{luft} \cdot A(v_a^2 - v_b^2)}{2}}$$

$$C_w = \frac{2100(0,20217 - 0,14651)}{1,225 \cdot 2,21 \left(\frac{17,36^2 - 3,472^2}{2}\right)}$$

$$C_w = 0,29846 \approx 0,30$$

Den oppgitte tabellverdien er 0,29 og den estimerte er 0,29846 som gir et prosentvis avvik på +2,9%. Dette stemmer godt med tabellverdien, $C_w = 0,29$.

Eksempel 3. Regn ut Rullemotstandskoeffisienten til Mirai ved hjelp av estimeringsmetoden oppgitt i kapittel 4.4.11.

- Det har vært utfordrende å fremskaffe verdien for rullemotstandskoeffisienten benyttet i Mirai 2. Rullemotstandskoeffisienten, f , til Mirai 1 er i litteraturen oppgitt til å være, $f = 0,0076$ [24].

Ettersom testen for å estimere en rullemotstandskoeffisient er den samme som testen utført i eksempel 2, benytter vi de samme verdiene. Fra eksempel 2 benytter vi de samme verdiene:

- $v_{a1} = 65 \text{ km/t}$
- $v_{a2} = 60 \text{ km/t}$
- $v_{b1} = 15 \text{ km/t}$
- $v_{b2} = 10 \text{ km/t}$
- $t_a = 6,87 \text{ s}$
- $t_b = 9,48 \text{ s}$
- $a_a = 0,20217 \text{ m/s}^2$
- $a_b = 0,14651 \text{ m/s}^2$
- $v_a = 17,36 \text{ m/s}$
- $v_b = 3,472 \text{ m/s}$
- Tyngdeakselerasjonskonstanten, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Rullemotstandskoeffisienten for Mirai 2, f_{Mirai2} :

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

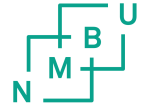
$$f = \frac{0,20217 \cdot (3,472)^2 - 0,14651 \cdot (17,36)^2}{9,81(3,472^2 - 17,36^2)} = 0,0147$$

Kommentarer:

- Rullemotstandskoeffisienten oppgitt i litteraturen [Kilde] for Mirai 1, $f_{\text{Mirai1}} = 0,0076$, og for Mirai 2 er den $f_{\text{Mirai2}} = 0,0147$.
- Dette vil si at den estimerte verdien for rullemotstandskoeffisienten for Mirai 2, $f_{\text{Mirai2}} = 0,0147$, viser seg å være nesten dobbelt så stor (93,4 prosent større) enn verdien for Mirai 1. Dette er ikke helt innlysende hvorfor luftmotstandskoeffisienten for Mirai 2 eventuelt er økt så mye siden Mirai 1, og det kan tenkes at det eksisterer feilkilder ved dette forsøket.

5.3. Usikkerhetsmomenter i beregninger

- I eksempel 2 og 3, i kapittel 5.3, ble det grunnet noe stigning i vei, utført test i begge retninger langs den samme to-felts veien og snittet av tidene ble benyttet. I ettertid har jeg dratt tilbake til teststedet og jeg observerer at asfalten ikke er like god i begge retninger, dvs. at det kan ha vært grunnlag for mer rullemotstand grunnet naturlige ujevnheter, grus og hakkete asfalt langs den ene retningen (det ene feltet). For at det skulle vært mer korrekt å bruke snittet av tidene målt i begge retninger så, måtte jeg ha kjørt i begge retninger langs samme veifelt.
- Tverrsnittarealet er en verdi jeg har måttet estimere ved hjelp av korreksjonsfaktoren, $X=0,86$. I utgangspunktet ville jeg valgt gjennomsnittsverdien $X = 0,90$, altså en noe høyere korreksjonsfaktor, men Toyota har fremhevet og uttrykker stolthet over forbedret aerodynamikk [17]. Dette er grunnen til at jeg valgte den laveste korreksjonsfaktoren, noe som gir laveste luftmotstandsverdien.
- Bilens masse, m_{bil} , er estimert basert på «Curb weight» som er bilens vekt uten passasjer og bagasje. Denne verdien har jeg satt til å være 1925 kg, som er gjennomsnittet av den oppgitte verdien mellom 1900-1950 kg [7]. Jeg har lagt til 75kg + 100 kg, som er en antatt vekt av sjåfør + passasjer. Dette er dog basert på antakelser, og det kan hende den reelle verdien vil være noe høyere eller lavere, noe som for eksempel vil kunne medføre at den beregnede verdien for ekvivalent massetregghetsmoment, m_{ekv} , i oppg. 5.9, vil kunne avvike fra den reelle verdien.
- Drivverkets virkningsgrad, η , er satt til å være 0,97 og motorens massetregghetsmoment, I_M , er satt til å være $0,1 \text{ kgm}^2$. Denne verdien er dog basert på tilsvarende verdier i en Tesla [38]. Dette skaper et usikkerhetsmoment i forhold til hvor korrekte beregninger vi kan få i oppgave 5.9, når det er usikkerhet knyttet til i hvilken grad disse oppgitte verdiene for Teslaen, samsvarer med de virkelige (reelle) verdiene for Mirai 2.
- Motorens momentkurve for Mirai 2 antar i denne oppgaven konstant effekt i turtallsområdet 3267 til 16500 RPM (maks turtall). I virkeligheten vil det basert på tabellverdier [V2] ikke være konstant effekt i dette turtallsområdet, hvilket vil gi en moment- og effekt som ligner på figur 5.1, som viste to «svaier». Det vil uansett være usikkerhet knyttet til hvor presist de estimerte moment- og effektkurvene i figur 5.6 vil kunne estimeres, da det er begrenset med oppgitte verdier fra Toyota grunnet konfidensialitet. I framtiden vil det kunne være mulig at det er oppgitt ytterligere dataverdier som gjør at slike kurver kan estimeres enda mer presist.
- Generelt så har flere verdier som er blitt benyttet i denne oppgaven, vært basert på estimeringer eller at vi har funnet tilsvarende dataverdier fra liknende biler. Dette vil skape et usikkerhetsmoment, da beregningene vil gjøres basert på mange verdier som vi ikke kan være trygge på i hvilken grad de stemmer
- I beregningene tar vi utgangspunkt i en målt hjulradius og ikke den dynamiske hjulradien. Dette vil kunne føre til noe usikkerhet knyttet til beregningenees grad av nøyaktighet.



- Drivverkets virkningsgrad (η): tar høyde for at det i drivverket vil være momenttap på grunn av friksjonstap i lagrene og tannhjulsoverføringer og verdien brukt i oppgaven er lånt fra Tesla [38] og vil fungere litt som et usikkerhetsmoment.

5.4. Forbedringspotensial i beregninger

Ved utførelsen av de teoretiske beregningene gjort i kapittel 5.1 ville det gitt et mer presist grunnlag for beregninger dersom jeg hadde brukt momentkurven til Mirai 2, slik produsenten har laget kurven. Til kommende ingeniørstudenter som eventuelt skulle lese og benytte denne masteroppgaven, kan det tenkes at denne typen data etter hvert vil offentliggjøres, da momentkurven etter min vurdering ikke oppgir noen data som vil være kritisk å beholde som klassifisert. Jeg observerer at hos andre bilprodusenter har det ikke vært uvanlig å offentliggjøre momentkurvene til deres biler, og det kan tenkes at Toyota også vil offentliggjøre dette etter hvert. I så tilfelle så vil resultatene kunne bli enda mer korrekte/presise dersom en skulle finne momentkurven til Mirai 2 på sikt.

I kapittel 5.2. hvor det ble utført praktiske tester, så ville testen for å estimere massetregghetsmomentet til hjulet vært mer presis dersom jeg hadde hatt med en hjelpeperson som kunne tatt tiden og ha fokus på når hjulet har passert sluttpunktet. Dette fordi det kan være utfordrende som en person å slippe et tungt hjul på omtrent 30 kg, følge med på tiden, stoppe tiden når hjulet passerer sluttpunktet, samt løpe ved siden av hjulet og stoppe hjulet etter passering av sluttpunktet for å unngå at hjulet velter på felgen, noe som kan medføre estetiske skader på felgen. Massetregghetstesten ble også utført på en regnværsdag. Dette kan medføre at hjulet til en viss grad kan skli samtidig som det ruller. Hvis det er tilfelle så kan det hende at man får en annen tid som igjen vil gi et noe upresist massetregghetsmoment i beregningene.

Ved de praktiske testene i kapittel 5.2. hvor retardasjonstidene ble tatt, så ville det gitt mer presise tider dersom testene ble gjort på en testbane som kanskje er enda mer horisontal, samtidig så ville det kanskje gitt enda bedre tidsestimater dersom det hadde vært montert et lite kamera som filmet speedometeret. På denne måten ville det i ettertid vært mulig å måle tiden basert på videoene tatt, noe som kunne gitt enda mer presise tider, som ville vært grunnlag for enda mer presise beregninger.

6. EKSTERN KONSEPTEVALUERING

Hensikten med dette kapittelet er å utnytte eksterne erfaringer og perspektiver for å få tilbakemeldinger på hydrogenbiler, med målet om å få en større forståelse for folks tanker og perspektiver rundt brenselcelledrevne biler med hydrogen som drivstoff. For å oppnå dette gjennomføres det en anonym spørreundersøkelse presentert i kapittel 6.2.

6.1. Hovedmål

Dersom Norge, som tidligere skrevet om, skal nå klimamålene for bilparken, så vil en implementering av hydrogenbiler som brukes av innbyggerne i Norge være en viktig bidragsyter til å nå målene. Hovedmålet med spørreundersøkelsen er å kartlegge erfaringer og behov knyttet til bruk av hydrogenbiler.

De overordnede spørsmålene jeg ønsker svar på er:

1. Er det en stor skepsis knyttet til bruk av hydrogenbiler i forhold til bensinbiler med tanke på faren eksplosjon eller brann?
2. Er det et ønske eller en villighet til å ta i bruk hydrogenbiler dersom infrastrukturen for hydrogenstasjoner var like god som infrastrukturen for bensinstasjoner?
3. Hva er viktige behov som må dekkes for å kunne ta i bruk hydrogenbiler?

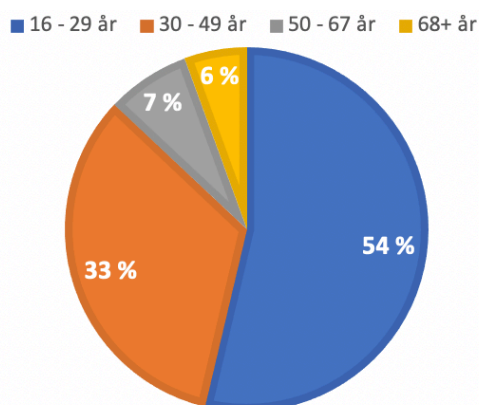
6.2. Testpopulasjon og resultater

Spørreundersøkelsen besvares som tidligere skrevet av «Testpopulasjonen», som består av mennesker fra 16 år og oppover. Hovedhensikten med spørreundersøkelsen er å kartlegge tanker rundt sikkerheten i hydrogenbiler blant de som enten er i en alder hvor de kan kjøpe og kjøre bil eller at de nærmer seg den alderen.

Spørreundersøkelsen [V3] starter med følgende korte innføring om hydrogenbiler:

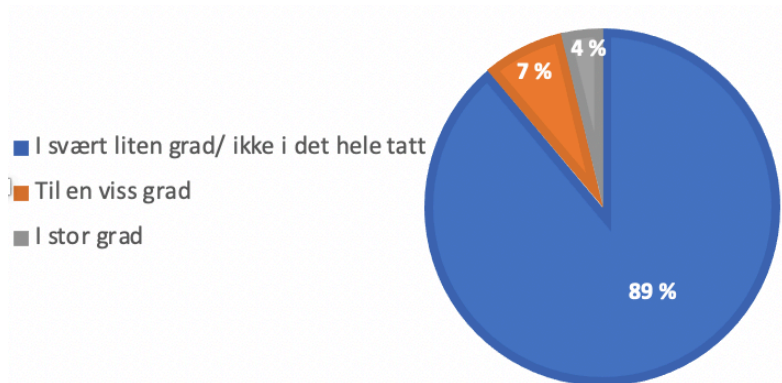
«En hydrogenbil er et nullutslippskjøretøy, og benytter hydrogengass i en brenselcelle til å generere elektrisk spenning til å drive hydrogenbilens elektriske motor. Hydrogenbilens drivstoff består derfor av hydrogengass lagret i spesialkonstruerte hydrogentanker i bilen»

1. Alder



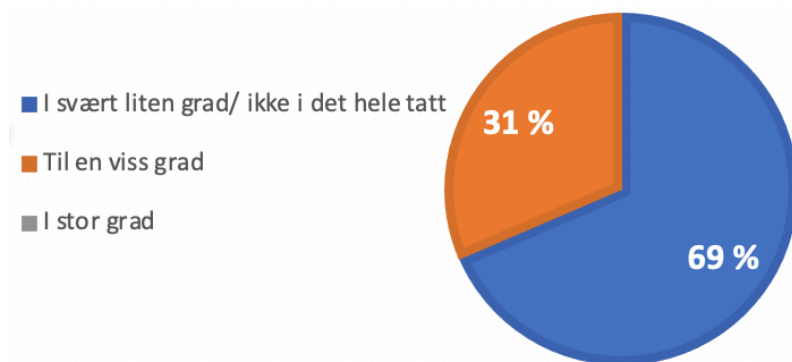
Figur 6.1. Aldersfordeling i Testpopulasjon

2. Er du skeptisk til å kjøre en bensinbil med tanke på faren for eksplosjon eller brann?



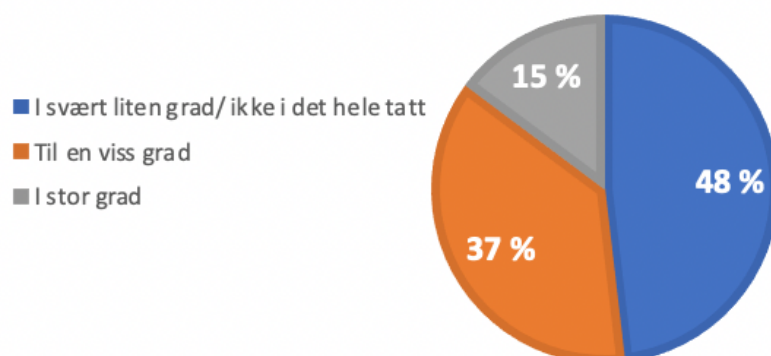
Figur 6.2. Resultater spørsmål 2 presentert i et sektordiagram

3. Er du skeptisk til å kjøre en hydrogenbil med tanke på faren for eksplosjon eller brann?



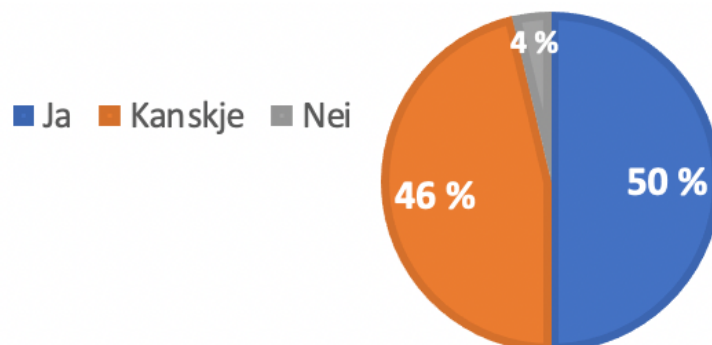
Figur 6.3. Resultater spørsmål 3 presentert i et sektordiagram

4. I dag finnes det få hydrogenstasjoner i Norge. Ville det påvirket valget ditt til eventuelt å kjøpe hydrogenbil dersom du også kunne fylle hydrogen på alle bensinstasjoner?



Figur 6.4. Resultater spørsmål 4 presentert i et sektordiagram

5. En bil du ønsker å kjøpe viser seg å være en hydrogenbil. Vil du la være å kjøpe bilen?



Figur 6.5. Resultater spørsmål 5 presentert i et sektordiagram

6. Hvis svaret var «Ja» eller «Kanskje» på det forrige spørsmålet; Hva er din begrunnelse?

Nedenfor gis en punktvis oppsummering av svarene blant de som svarte «Ja» eller «Nei»:

- Det er vanskelig å skulle planlegge langturer eller bilferier når det er så få hydrogenstasjoner i Norge.
- Lite kjennskap til hydrogenbiler vil kunne påvirke et eventuelt kjøp av hydrogenbiler.
- Lite erfaring med hydrogenbiler og følgelig ingen erfaring som kan si noe om hvor driftssikre disse bilene er i forhold til om det plutselig skulle oppstå noen veldig kostbare reparasjoner og liknende.
- En respondent svarer at vedkommende har hørt om eksplosjonen på hydrogenstasjonen i Sandvika i 2019 og at dette har gjort vedkommende noe skremt når det gjelder bruk av biler som lagrer komprimert hydrogengass
- Det finnes en skepsis til «ny» bilteknologi, men denne skepsisen vil kanskje avta jo vanligere slik biler blir å se på norske veier.

7. Hvilke behov må en hydrogenbil tilfredsstille for at du eventuelt skulle gå over til bruk av hydrogenbil?

Nedenfor gis en punktvis oppsummering av svarene. Flere like svar vil oppsummeres i et punkt.

- Bedre infrastruktur for hydrogenbiler
- Statlige Intensiver som for eksempel gratis parkeringsplass, fritakelse for diverse bilrelaterte avgifter for å gjøre det mer attraktivt å benytte hydrogenbil.
- Gode garantier som for eksempel garanti på brenselcellen i 10 år.

8. Eventuelle tilleggskommentarer

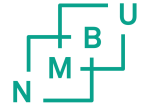
- «Jeg anser meg selv som en relativt erfaren bilist og bilkjøper. Jeg vet ikke nok om hydrogenbiler til at jeg helt sikkert kan si at dette er et dårlig bilvalg, men jeg kan heller ikke nok om disse bilene til at jeg kan være trygg på at jeg kjøper noe som vil fungere om vinteren når jeg skal hjem fra hyttetur på fjellet i minus 20. Skal jeg kjøpe hydrogenbil så må jeg ha mer erfaring eller noe form for dokumentasjon på at bilen fungerer i diverse kjøreforhold og temperaturer».
- En mye bedre infrastruktur for fylling av hydrogengass er veldig avgjørende for en eventuell overgang til hydrogenbiler.
- Er prisen på hydrogengass konkurransedyktig med prisen for bensin/diesel/kWh?
- Stabilitet i pris på hydrogengass
- «Positivt med nullutslippsbiler. Hydrogenbiler bruker få minutter på fylling, så hvis det hadde vært nok hydrogenstasjoner ville jeg heller gått for en hydrogenbil, enn en hel-elektrisk bil»
- Få/ingen verksteder som er spesialiserte på å fikse hydrogenbiler og hydrogenkomponenter

6.3. Resultatolkning

Basert på resultatene fra spørsmål 2 og 3, så viser svarene blant testpopulasjonen at det er en større andel av respondentene som er mer skeptiske til hydrogenbiler på grunn av faren for eksplosjon eller brann, sammenliknet med bensinbiler. Det er faktisk så mye som at omtrent 1 av 3 personer i spørsmål tre svarer at de til en viss grad er skeptiske til å kjøre en hydrogenbil med tanke på faren for eksplosjon eller brann. Når det gjelder bensinbiler så føler omtrent 90 prosent av deltakeren «i liten grad/ikke i det hele tatt» på skepsisen knyttet til faren for brann eller eksplosjon. Følgelig kan vi trekke den tolkningen at på bakgrunn av denne spørreundersøkelsen viser det seg å være en større skepsis ovenfor de sikkerhetsrelaterte aspektene ved hydrogenbiler, sammenliknet med bensinbiler. Et viktig moment ved eventuell markedsføring for hydrogenbiler bør følgelig være å overbevise forbrukerne om at hydrogenbiler er relativt trygge biler.

I spørsmål 4 svarer til sammen 85 prosent at det enten «Til en viss grad» eller «I stor grad» ville påvirket valget til eventuelt å kjøpe hydrogenbil, dersom det på alle bensinstasjoner også var mulig å fylle hydrogen. I spørsmål 5 stilles problemstillingen: «En bil du ønsker å kjøpe viser seg å være en hydrogenbil. Vil du la være å kjøpe bilen?». Blant respondentene svarer 50 prosent «Ja» og 46 prosent «kanskje», men kun 4 prosent svarer at det ikke ville påvirket valget.

For å få et innblikk i respondentenes tanker på valg av svar i spørsmål 5, viser svarene i spørsmål 6 at det i stor grad handler om de svært begrensede mulighetene til å kunne fylle hydrogen (drivstoff), samt erfaringen man har med driftssikkerheten i hydrogenbiler som er såpass liten, at det skapes usikkerhet knyttet til kostnadene knyttet til å eie hydrogenbil. Det uttrykkes også det som kan tolkes som en form for skepsis når det gjelder ny bilteknologi, men at dette kanskje avtar jo vanligere det blir å se slike biler (hydrogenbiler) ute på norske veier. Oppsummert kan det tolkes som at det kan finnes en villighet til å ta i bruk hydrogenbiler, men at slik det er i dag med de begrensede mulighetene for fylling av hydrogen, så gjør dette



hydrogenbiler til et mindre attraktivt valg. I tillegg til dette vil det kunne være behov for økte kunnskaper om disse bilene blant potensielle forbrukere, som har lite kunnskap og erfaring med slike biler.

I spørsmål 7 og 8 som tar for seg henholdsvis behovene hydrogenbiler må dekke og eventuelle kommentarer/tilbakemeldinger, framkommer det at bilister er avhengige av god infrastruktur for fylling av drivstoff, samt å ha en god grunn til å benytte hydrogenbiler ettersom man har god erfaring med driftssikre biler med forbrenningsmotor, samt at man begynner å få gode erfaringer med elbiler. Slik jeg tolker det så er det statlige insentiver, som gjør det økonomisk mer gunstig å ta i bruk hydrogenbiler som vil kunne virke som en «pådriver» til å ta i bruk hydrogenbiler. Basert på svarene fra spørsmål 7 og 8, kan vi tolke at stabilitet i pris, samt en konkurransedyktig pris på hydrogengass også vil være viktige kriterier.

Basert på spørreundersøkelsen kan en konklusjon være at hydrogenbiler har en reell mulighet til å lykkes i det norske bilmarkedet, men at viktige momenter for å oppnå dette vil være god infrastruktur for hydrogenfylling, stabilitet og konkurransedyktighet i priser for hydrogengass, samt statlige insentiver som gjør det økonomisk mer gunstig å benytte hydrogenbiler.

Årsaken til at spørsmål 1 tar for seg hvilke aldersgrupper som er med på å besvare spørreundersøkelsen er for å prøve å få et representativt utvalg når det gjelder aldersgrupper som besvarer undersøkelsen. Spørreundersøkelsen ble besvart av 54 respondenter, hvilket vil si at spørreundersøkelsen ikke har tatt for seg mange nok respondenter til at vi kan få et representativt utvalg i den norske befolkningen. I tillegg til dette er 54 prosent av respondentene blant testpopulasjonen, i alderen 16-29 år. Dette er en aldersgruppe hvor mange kanskje ikke har etablert seg eller kommet i en stabil fase i livet med god økonomisk råd. Følgelig vil spørreundersøkelsen ikke være representativ nok til å trekke noen sterke beslutninger, men kunne fungere som en indikasjon for å kartlegge tanker, erfaringer og behov knyttet til hydrogenbiler.

7. DISKUSJON

Virkelighetsnære resultater

Resultatet av de teoretiske beregningene viser at estimatene brukt i denne oppgaven er virkelighetsnære. Dette fordi at ved hjelp av moment- og effektkurven som ble estimert og utviklet i beregningene så ble det gjort beregninger på hvor lang aksellerasjonstid hydrogenbilen (Mirai 2) ville bruke på å akselerere fra 10-96 km/t. Den beregnede aksellerasjonstiden er 9,4 sekunder, og ved sammenlikning opp mot hastighetskurven fra den fysiske testkjøringen av Mirai 2 som er på 9,3 sekunder (avlest verdi), så gir dette et prosentvis avvik på omtrent 1,1 prosent. Følgelig kan man argumentere for at moment- og effektkurven gir gode utgangspunkt for drivverk- og drivkraftberegninger.

Masteroppgavens bidrag

Etter at det ble kjent at det ikke var mulig å fremskaffe moment- og effektkurve, oversiktsbilde over drivverket, samt andre verdier som for eksempel massetregningsmomentet til hjulet, måtte jeg - som tidligere skrevet - benytte meg av estimater og estimeringsmetoder for å finne diverse verdier, samt resonnere fram til diverse konklusjoner og antakelser. Masteroppgavens bidrag, er først en grundig innføring i sentrale komponenter i hydrogenbilen og hvordan de sentrale komponentene, inkludert drivverket, samvirker i en hydrogenbil. Deretter er bidraget adressert til en grundig teknisk innføring i hvordan sikkerhet ivaretas i hydrogenbiler, blant annet ved kollisjoner. Det nye bidraget med oppgaven vil være moment-, effekt- og drivkraftkurvene av hydrogenbilen Mirai 2, som i ettertid kan benyttes av ingeniørstudenter og andre til å gjøre andre drivverks- og drivkraftberegninger. Brenselcellebilen som har vært i fokus har vært Toyota Mirai.

For å få en oversikt over ulike sentrale komponenter på et så detaljert nivå at selv motorstyringsenheter («hjernen») beskrives hver for seg, så har Toyota Norge gitt meg tilgang til TechDoc, som er deres tekniske database. TechDoc er noe man vanligvis ikke har tilgang til, men som jeg, grunnet samarbeidet med Toyota Norge, fikk tilgang til. Følgelig var det naturlig at fokuset gjennom oppgaven har vært på Toyota Mirai. Jeg har ikke sammenliknet Mirai i noen særlig grad med andre merker av brenselcellebiler. Dette kan på en måte sees på som en svakhet, altså at jeg i størst grad har hatt fokus på Toyota Mirai, men på den andre siden så opplever jeg at mye av det teknisk viktige fra et ingeniørfaglig perspektiv, er veldig begrenset. Mye av dataene som utgis er på et kommersielt nivå og jeg vil tro at oversiktene over flere av de sentrale komponentene, samt detaljgraden til avsnittet jeg skrev «Virkemåten til en brenselcelle på ti steg» i kapittel 4, vil være et godt bidrag.

Videre kan det sies at hydrogenbilene er bygget rundt mange av de samme prinsippene, både når det gjelder de sikkerhetsmessige prinsippene og drivverksoppbygningen. For eksempel så er den brenselcelledrevne Hyundai Nexa 2019, en hydrogenbil som på lik linje med Toyota Mirai også består av en elektrisk motor og reduksjonsgir [44]. Derfor kan det sies at det er en stor grad av overførbarhet når det gjelder tekniske virkemåter og prinsipper mellom hydrogenbiler.

Drivkraftberegningene baserer seg på moment- og drivkraftkurvene som jeg ikke har klart å finne i andre oppgaver, artikler eller liknende. Årsaken til at det har vært ulike typer data som

jeg ikke har fått oppgitt av Toyota Norge, er fordi dette er noe de ikke opererer med til daglig, og at de måtte sende søknader til Toyota i Japan for å få utlevert disse typer data, grunnet konfidensialitet [35]. Derfor kan en svakhet med oppgaven tolkes å være at dersom jeg hadde fått oppgitt konfidensielle verdier, så ville det kanskje reduser usikkerhet i beregninger, men på den andre siden er det en stor sannsynlighet for at masteroppgaven da ville kunne bli konfidensiell for allmenheten.

På mange måter er hensikten med oppgaven å gi et norsk teoretisk bidrag i forhold til temaene oppgaven tar for seg, men en utfordring ved oppgaven kan adresseres til språklige utfordringer. Ettersom dette er blant de første avhandlingene som tar for seg blant annet komponentene i hydrogenbilen, så er det lite sammenlikningsgrunnlag. Dette medfører at flere av komponentene på norsk, er navn jeg har oversatt fra engelsk til norsk. Følgelig kan det tenkes at det finnes andre og kanskje mer presise måter å beskrive disse komponentene på, som kan være teknisk mer korrekte. På grunn av dette gjøres det oppmerksom på at andre kilder kan bruke annen terminologi på komponenter enn den terminologien jeg har satt. For eksempel sa teknisk instruktør Terje Wiltih [35] at «final gear» i drivverket kan betraktes som differensialen i drivverket, men dette kunne også vært oversatt til «utgående gir».

Praktiske tester

Ved den praktiske testen for å estimere massetregghetsmomentet ble det i ettertid oppdaget mulige feilkilder. Det ble oppdaget at rampen testen ble utført på, kanskje ikke var montert på et horisontalt underlag, noe som kanskje medførte at vinkelen jeg brukte i mine beregninger ikke var riktig. Grunnen til at skaterampen eventuelt ikke skulle være montert på horisontalt underlag er fordi at de som har bygget skateparken ønsker avrenning for å få vann som kommer av nedbør vekk fra skateparken. Derfor ble det gjort måling med vaterfunksjonen i iPhone-applikasjon som heter «Måleverktøy», som viste at vinkelen på omtrent 16,7 grader, og følgelig var passende å bruke.

Når det gjelder massetregghetsmomentet til hjulet så ble det benyttet diverse måter for å estimere denne verdien, og ettersom det prosentviseavviket mellom verdiene er relativ liten, kan det antas at estimatene er gode å bruke.

Rullemotstandskoeffisienten estimert for Mirai 2, gir en verdi som er nesten dobbelt så stor som rullemotstandskoeffisienten for Mirai 1. I beregningene jeg har gjort, brukte jeg verdien for Mirai 1. Når beregningene jeg utfører som baserer seg på rullemotstandskoeffisienten i Mirai 1, gir så virkelighetsnære resultater, så vil jeg anta at det er noe usikkerhet knyttet til testen for å estimere rullemotstandskoeffisienten.

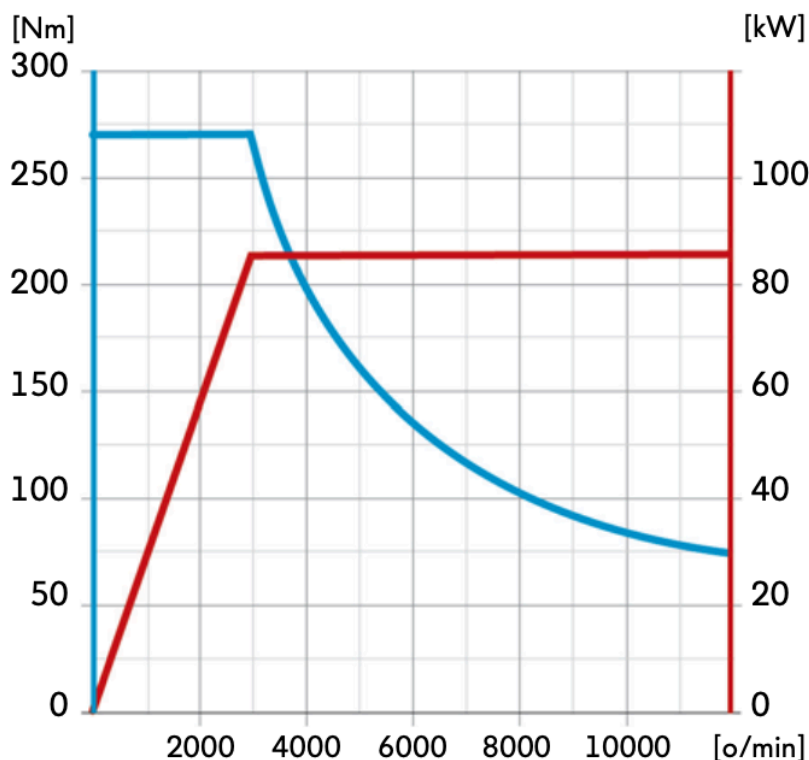
Ettersom den praktiske testen for å estimere luftmotstandskoeffisienten er identisk med testen for å estimere rullemotstandskoeffisienten, så tyder det kanskje på at noe har blitt gjort feil eller ikke tatt hensyn til i gjennomføringen av testen. Det viser seg dog at den estimerte luftmotstandskoeffisienten på omtrent 0,30 i forhold til den teoretiske luftmotstandskoeffisienten 0,29 samsvarer meget godt.

Derfor kan det diskuteres for at selve gjennomføringen av testen har blitt utført på en korrekt måte, og at det ikke helt sikkert kan bekreftes eller avkreftes at den estimerte rullemotstandskoeffisienten for Mirai 2, som er omtrent dobbelt så stor som rullemotstandskoeffisienten i Mirai 1, er feil. Dette med mindre man skulle utføre andre tester for å estimere rullemotstandskoeffisienten eller hvis dette er data som senere eventuelt blir

offentliggjort. På denne måten ville man hatt et sammenlikningsgrunnlag, hvilket ikke er tilfellet per nå.

Moment- og effektkurven

Som tidligere skrevet så antok jeg konstant effekt i turtallsområdet hvor momentkurven faller. Denne antakelsen er blant annet inspirert av momentkurven i figuren under, som tilhører vekselstrømmotoren VX54 som benyttes i e-Golf.

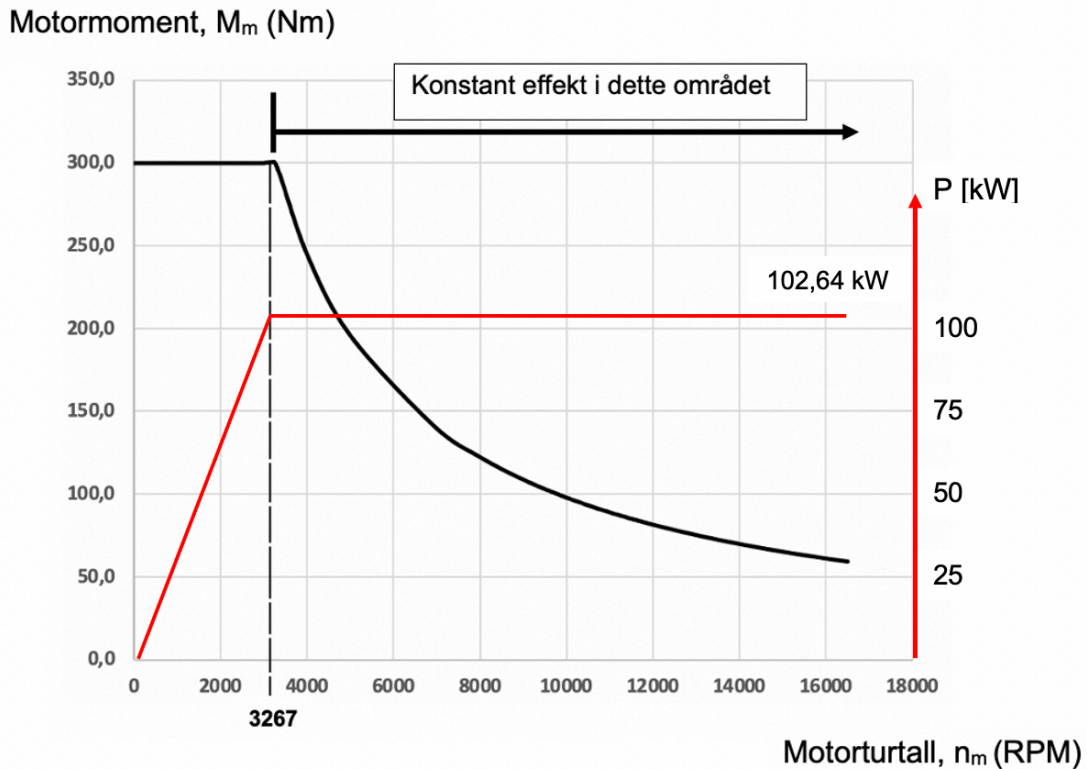


Figur 7.1. Moment- og effektkurve e-Golf [52]

Momentkurven til e-Golfen har de samme karakteristikkene som den estimerte momentkurven til Mirai 2, som ble utviklet i oppgave 5.7, selv om maksimummomentet til e-Golfen er omtrent 50 Nm mindre enn Mirai 2 og maks turtall 12000 RPM, mens Mirai 2 har maks turtall 16500 RPM (se figur 7.2 under).

Det må til tross for likhetene nevnes at ettersom momentkurven til Mirai har en makseffekt som ligger over turtallsområdet med konstant maksimummoment, så vil dette medføre at momentkurven egentlig vil ha to svaier, minimum. Dette gjelder for området hvor det er antatt konstant effekt (se figur 7.2).

I oppgave 5.10d ble den estimerte momentkurven til Mirai 2 med kun én svai benyttet og resultatet til den teoretisk beregnede akselerasjonstiden hydrogenbilen vill bruke fra 10-96 km/t var svært samsvarende med den praktisk testede tiden hydrogenbilen brukte. Kun 0,2 sekunder skilte teori og praksis, hvilket indikerer at momentkurven på neste side i figur 7.2. er en virkelighetsnær momentkurve som kan benyttes i drivkraftrelaterte utregninger.



Figur 7.2. Moment- og effektkurve Mirai 2, utviklet i oppg. 5.6

Kildekritisk

Det har vært interessant å jobbe med en masteroppgave om hydrogenbilen Mirai 2, men det har også vært utfordrende å forholde seg til informasjon på nettet. Dette fordi Mirai 2 er en relativt ny bil og at det er få, om ingen, avhandlinger skrevet om denne brenselcellebilen (i hvert fall på norsk). Dette har medført at jeg har måtte være ekstra kritisk til kilder selv om de framstår som pålitelige. Eksempelvis så skrev Motortrend som er et stort bilmagasin, i en artikkel etter at de hadde prøvekjørt Mirai 2, at: «When the transmission shifted gears», altså «når girkassen skiftet gir» [42]. Dette er noe som kan skape oppfattelsen om at det er flere gir i bilen, noe som ikke stemmer da bilen kun har et reduksjonsgir og ikke har behov for noen flere gir og utvekslingsforhold. Dette grunnet momentkurvens oppbygning, som er slik at bilen har nok moment å operere med i et stort turtallsområde.

Selvkritikk i masterarbeidet

Det å få jobbe med brenselcellebiler (hydrogenbiler) som er fremtidsrettet med tanke på miljø og bærekraft, har gjort at jeg har blitt veldig begeistret for denne typen teknologi, særlig fordi jeg er student ved Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet, som er et miljø- og bærekraftorientert universitet. Dette kan ubevisst ha medført at jeg blir mindre kritisk til potensielle konsekvenser ved brenselcelleteknologi fordi jeg kan ha blitt så begeistret av potensialet hydrogenbiler kan ha for å nå klimamålene, særlig når det gjelder bilparken. Jeg har dog forsøkt å jobbe med masteroppgaven med et kritisk, men åpent sinn og jeg skal blant annet forsøke å oppsummere og konkludere i det neste kapittelet på hva jeg har avdekket i denne masteroppgaven.

Tidligere litteratur

Det har som tidligere skrevet vært utfordrende å fremskaffe og benytte tidligere artikler, avhandlinger (spesielt på norsk). som et sammenlikningsgrunnlag underveis i oppgaven. Dette fordi det er begrenset data som er offentliggjort når det gjelder hva som finnes tilgjengelig av slik offentliggjort data om for eksempel brenselcelle- og/eller sikkerhetsteknologi, samt drivverk i brenselcellebiler som benytter hydrogen som drivstoff.

På den måten kan en svakhet ved oppgaven trekkes fram som at det ikke er gjort nok sammenlikning med hva tidligere oppgaver har avdekket, samt at oppgaven i all hovedsak har brukt Toyota Mirai som utgangspunkt. Argumentene mine er dog at jeg har fått tilgang til Toyotas tekniske database som ofte har vært en svært presis og detaljert informasjonskanal og ressurs for presise data. Utredningen av Toyota Mirai er også i stor grad overførbart til andre brenselcellebiler. En styrke ved oppgaven vil være at masteroppgaven vil være blant de første masteroppgavene til Drivverk og sikkerhetsmessige prinsipper i kjøretøy med brenselceller, hvilket vil kunne være interessant og viktig fra et miljø- og bærekraftig perspektiv og særlig fra et ingeniørfaglig perspektiv.

Prosessdiskusjon

Arbeidsprosessen har i stor grad samsvart med figur 4.3: «Oversikt over prosessstrinn i masteroppgaven». En interessant erfaring har vært at progresjonen i prosessen har vært slik at jeg har måttet fullføre de enkelte trinnene langs fase 1 «Utredning» og fase 2 «Utvikling» i kronologisk rekkefølge, og hatt begrenset med muligheter til å gjøre aktiviteter parallelt, særlig i disse to fasene. Dette kommer av at aktivitetene under deltrinnene følger en kronologisk rekkefølge hvor de bygger på hverandre. Dette vil si at jeg ikke har kunnet jobbe med for eksempel å kartlegge sikkerhetsaspekter i brenselcellebiler, uten å ha gjennomført et litteraturstudium og opparbeidet med kunnskaper om dette tema.

I fase 3 «Teoretiske og praktiske beregninger», samt fase 4: «Ferdigstilling» har det vært mulig å gjøre flere aktiviteter parallelt med hverandre, samt at deltrinnenes karakter har medført at jeg har måtte gå tilbake til tidligere deltrinn for å gjøre aktiviteter på nytt. For eksempel i deltrinn 3, fase 3, så undersøker jeg forbedringspotensialet ved beregningene jeg har gjort. Dette fører meg tilbake til deltrinn 1, fase 3, hvor jeg på nytt utfører de teoretiske og praktiske beregninger. Det å tegne opp prosessdiagrammet i figur 3.1 har gjort meg svært bevisst på hvordan jeg har jobbet med masteroppgaven. Dette er noe som har gjort meg bevisst på at jeg opplever større grad av linearitet i prosessen enn det jeg har gjort ved for eksempel tidligere produktutviklingsprosjekter, hvor det er et stadig fokus på å få tilbakemeldinger og gjenta en tidligere aktivitet på nytt basert på tilbakemeldinger. Denne masteroppgaven har derimot vært mer preget av linearitet, hvilket vil si at først når jeg har utført et deltrinn i en fase, har det vært mulig å bevege seg til de neste aktivitetene i et nytt deltrinn. Dette særlig fordi mye av teorien er bygget på hverandre.

8. KONKLUSJON

Gjennom denne mastergradsoppgaven er det gjort en utredning av brenselcellebiler (hydrogenbiler) hvor det er gjort rede for sentrale komponenter og virkemåter for teknologien som ligger til grunn for disse bilene. Det er videre gjort en utredning av hydrogen som en introduksjon til utredningen av de sikkerhetsmessige prinsippene i hydrogenbilen. Dette har blant annet vært med på å danne forståelsen for at hydrogenbiler er relativt trygge biler basert på sikkerhetstiltakene i bilen. Videre er det presentert et teoretisk formelverk, samt gjennomgang av drivverket i hydrogenbilen Mirai 2. Dette har vært viktig for å utføre og forstå drivverk- og drivkraftberegninger utført i oppgaven. Det er også blitt gjennomført en spørreundersøkelse for å få eksterne perspektiver og tilbakemeldinger på hydrogenbiler, som kan hjelpe oss med å forstå hvilke momenter og fokusområder som vil være viktige hos potensielle framtidige forbrukere, samt for å etablere og implementere hydrogenbiler i samfunnet.

Følgende konklusjoner er tatt på bakgrunn av oppgaven:

- Brenselcellebilen Mirai 2 sitt drivverk består av en elektrisk permanentmagnet motor, reduksjonsgir og differensial.
- Hydrogenbiler benytter elektriske motorer som har et høyt konstant dreiemoment helt fra 0 RPM, og fram til et gitt turtall. Herifra vil momentkurven falle med en « $1/x$ »-kurve, i tilfellet med Mirai 2 er dette gitte punktet ved 3267 RPM.
 - På grunn av motormomentkurvens karakteristikk, samt turtallsområdet som i Mirai 2 er 16500, hvilket er to ganger så mye som en typisk vanlig personbil, er det kun behov for et reduksjonsgir.
- Brenselcellebiler (også kalt brenselcelle-elektriske biler eller hydrogenbiler) benytter hydrogen som brensel i en brenselcelle, og genererer elektrisk spenning i brenselcellen ved å spalte hydrogen i protoner og elektroner. I en ekstern elektrisk krets brukes elektronene til å drive hydrogenbilens elektriske motor, som i sin tur driver drivhjulene.
- Brenselcellebiler likner på mange måter på en hel-elektrisk bil, hvor hovedforskjellen ligger i at den elektriske motoren i hel-elektriske biler forsynes av store batteripakker, hvor de hovedsakelig (se bort ifra regenerativ bremsing) bruker det elektriske nettet til å lade batteriene som driver EI-motoren. Sammenligner man dette med brenselcellebiler, så vil man i en brenselcellebil fylle hydrogengass i bilens hydrogentanker og den elektriske spenningen som driver EI-motoren, genereres i selve brenselcellen. Altså kan man konkludere med å si at hydrogenbiler bærer rundt på sitt eget kraftverk.
- Toyota Mirai er en av to hydrogenbiler i Norge, og kan kun Leases og ikke selges fordi Toyota ønsker rettighetene på sin side og muligheten til å trekke tilbake bilene ved eventuelle uforutsett oppstått problematikk.



- Hydrogenbiler kan, dersom hydrogenet produserer på en bærekraftig og miljøpåpasselig måte, bidra til å nå klimamålene for bilparken.
- Det er på bakgrunn av den utførte spørreundersøkelsen grunn til å tilrettelegge for en markedsføringsstrategi som fokuserer på å skape trygghet og tillit blant potensielle framtidige forbrukere, når det gjelder sikkerheten i hydrogenbiler med tanke på faren for eksplosjon og brann. Dette fordi 1 av 3 uttrykker «Til en viss grad» skepsis med tanke på faren for eksplosjon og brann i hydrogenbiler.
 - Ved en slik markedsføring av hydrogenbiler beskrevet ovenfor, vil en kunne nå ut og påvirke en større andel av potensielle forbrukere.
- Brenselcelleteknologi i hydrogenbiler er utredet, hvor Toyota Mirai benytter PEM-brenselcellen. Andre typer brenselceller er også presentert.
- Hydrogenbiler defineres som nullutslippsbiler og kan potensielt sett være en viktig bidragsyter til at vi når klimamålene for bilparken. Dette fordi brenselcelleteknologi kan ha store miljøgevinster gitt at hydrogenet produseres ved hjelp av fornybar energi (solceller, vannkraft), såkalt grønn hydrogenproduksjon.
- Hydrogen er svært tilgjengelig, men oftest i molekyler med andre grunnstoffer, altså ikke isolert/ rent hydrogen. Hydrogen er 14-15 ganger lettere enn luft og vil stige til himmels ved en hydrogenlekkasje med en hastighet på ca. 72 km/t.
- Hydrogen som er viktig å forstå for å kunne tilrettelegge en tilpasset sikkerhetsteknologi i hydrogenbiler er utredet og gjennom utredning av de sikkerhetsmessige prinsippene framkommer det at hydrogen ved bestemte konsentrasjoner kan være svært antennelig både når det gjelder risikoen for brann og eksplosjon. Dette er tatt hensyn til gjennom en tilpasset sikkerhetsteknologi blant annet ved hjelp av tre hydrogendetektorer som skal oppdage slike lekkasjer, ettersom hydrogen verken kan oppdages visuelt av synet eller gjennom lukt.
- De fire sikkerhetsmessige prinsippene som gjelder i hydrogenbilen, er å;
 - 1) unngå lekkasje av hydrogengass, 2) oppdage og stanse lekkasjer med hydrogendetektorer, 3) unngå akkumulering av hydrogengass og 4) holde tenn kilder unna hydrogenkomponenter.
- For brenselcellebilen Mira 2 så består de sentrale komponentene ved drivverk- og drivkraftberegninger av elektrisk motor og drivverk bestående av reduksjonsgir og differensial, som har et totalt utvekslingsforhold, $i_{total} = 11,691$.
- Konklusjonen for hvor vidt brenselcellebiler vil lykkes i det norske bilmarked avhenger i stor grad av en god infrastruktur for fylling av hydrogen. Per dags dato er infrastrukturen svært begrenset med kun et fåtall hydrogenstasjoner i Norge, men det er grunn til å tro at dette vil satses på og utvikles.

8.1. Anbefalinger

- Det anbefales å undersøke om noen av de tekniske verdiene brukt i denne oppgaven, som baserer seg på Tesla-verdier, eller verdier som er estimerte i denne oppgaven, kan være verdier som har blitt offentliggjort eller publisert. I så tilfelle vil en kunne gjøre enda mer nøyaktige beregninger med disse eventuelt oppgitte verdiene.
- Det anbefales at ved fysisk testkjøring å undersøke tilgjengeligheten til å gjennomføre tester som krever høye hastigheter, på en egnet testbane. Dette vil medføre en større grad av sikkerhet og nøyaktighet ved testene.
- Det anbefales videre å gjøre beregninger av teoretisk aksellerasjonstid for eksempel fra 0 km/t til 140 km/t og undersøke hvordan dette stemmer med den fysiske (målte) aksellerasjonstiden fra 0- 140 km/t på en testbane. Dette er for å undersøke i hvilken grad moment- og effektkurvene estimert og utviklet i de teoretiske beregningene, stemmer ved de høyeste turtallsområdene.

8.2. Videre arbeid

- Gjennomføre beregning av aksellerasjonstid i et tidsintervall som strekker seg mot de høyere turtallsområdene til Mirai 2. Jeg vil i et videre arbeid undersøke om aksellerasjonstiden jeg beregner slik som i oppgave 5.9d), fortsatt vil gi meg virkelighetsnære resultater. For å gjøre dette må det også gjennomføres fysisk testing hvor man kan kjøre i høye hastigheter. Gitt norske fartsgrenser, vil dette, lovlig, kun være mulig ved testkjøring på testbane.
- Utvikle flere regneoppgaver blant annet med retardasjonsmåling for å beregne bremseenergien ved bilens forskjellige kjørenivåer (sport, normal, eco, osv.)
- Fremskaffe tekniske verdier basert på andre brenselcellebiler, utføre tilsvarende estimerte moment-, effekt- og drivkraftkurver og sammenlikne de med tilsvarende kurver utviklet i denne oppgaven av Toyota Mirai 2.
- Utrede andre brenselcellebiler og kartlegge likheter og ulikheter, og undersøke hvordan samt hvor vidt de forskjellige brenselcellebilene skiller seg fra hverandre.
- I et videre arbeid ville jeg gjort testen for estimering av rullemotstandskoeffisienten på nytt, for å undersøke om jeg vil få verdier som likner mer på den oppgitte rullemotstandskoeffisienten for Mirai 1.
- I et videre arbeid ville jeg jobbet videre med språkvasking og kvalitetssikring av oppgaven for eksempel for å undersøke om noe av innholdet i rapporten er reptetativt osv.

REFERANSER

Skriftlige kilder

[4]: G. Terjesen. (2021). Kompendium: *Grunnlag i drivverk og drivkraftteori*. TMP271 Maskin- og kjøretøydynamikk. NMBU/RealTek-2021 Rev2. 54 s.

[8]: L. Lundby, J. E. Moen, I. Myklebostad. (2002). *Motorteknikk: Bilteknikk*. Gyldendal Norsk Forlag AS.

[11]: G. Terjesen. (2022). kompendium: *Grunnlag i drivverk og drivkraftteori*. TMP310 Maskin- og kjøretøydynamikk. NMBU/RealTek-2022. 54 s.

[21]: Praxair. (Ingen oppgitt utgivelsesdato). Booklet: *Gassfarer og Gassikkerhet*. 43 s.

[24]: J. Hayes, G. A. Goodarzi. (2017). *Electric Powertrain: Energy Systems, Power Electronics and Drives for Hybrid, Electric and Fuel Cell Vehicles*. Wiley.

[32]: D Hart. Editor (2004). "Hydrogen, End Uses and Economics," i C.J. Cleveland (Red.). *Encyclopedia of Energy*. Elsevier. 231-239s.

[37]: R. Bosch. (2018). *Automotive Handbook*. Wiley

[38]: G. Sieklucki. (2018). *An Investigation into the Induction Motor of Tesla Model S Vehicle*. 6s. https://www.researchgate.net/publication/327191420_An_Investigation_into_the_Induction_Motor_of_Tesla_Model_S_Vehicle, besøkt 15.05.2022.

[68]: VAG (2021). Foredrag fra Møller ved Per-Olav Silviken 03.05.2021: *Motoroptimering for reduksjon av utslipp*. TMP271 Maskin- og kjøretøydynamikk. NMBU/Realtek-2021. 24 s.

[75]: G. Terjesen. (2021). Kompendium: *Torsjonssvingninger*. TMP271 Maskin- og kjøretøydynamikk. NMBU/RealTek-2021 52 s.

[78]: K. Nakamura. (2021). *Development of FCV Transaxle*. SAE International. 5 s.

Personlig kommunikasjon

[1]: Video «NG MIRAI – Old vs. New.mp4». Toyota Norge (T. Wiltihl). Mottatt 04.02.2022.

[3]: PowerPoint «NG MIRAI norsk presentasjon 1.pptx». Toyota Norge (T. Wiltihl). Mottatt 04.02.2022.

[12]: PowerPoint «Lecture 2B - FCEV component overview.pptx». Toyota Norge (T. Wiltihl). Mottatt 04.02.2022.

[19]: PowerPoint «8_FC Components.pptx». Toyota Norge (T. Wiltihl). Mottatt 07.01.2022

[20]: PowerPoint fra Toyota «1_The vision.pptx». Toyota Norge (T. Wiltihl). Mottatt 07.01.2022



[52]: Om e-Golf «SSP_e-Golf.pdf», G. Terjesen. Mottatt 13.03.2022.

[69]: PowerPoint «Lecture 1- FC system components & operation». Toyota Norge (T. Wiltihl). Mottatt 04.02.2022.

[70]: PP: «9_FC safety measures.pptx». Toyota Norge (Terje Wiltihl). Mottatt 07.01.2022.

[72]: PP: «5_Hydrogen Safety.pptx». Toyota Norge (Terje Wiltihl). Mottatt 07.01.2022.

[73]: Epost: Diskusjon av moderne forbrenningsmotorers momentdiagram, G. Terjesen, 09.05.2022]

[74]: Epost: Estimering av massetregghetsmoment til hjul utsatt for ren rulling ned et skråplan: «TM.hjul» G.Terjesen. Mottatt 05.03.2022

Ressursperson

[35] Terje Wiltihl, teknisk instruktør Toyota Norge, våren 2022.

Videoer fra nett

[23]: "Hydrogen vs. Gasoline Leak and Ignition Test- which is safer?".

<https://www.youtube.com/watch?v=OA8dNFVaF0>, besøkt 26.03.2022.

Nettkilder

[5]: Introduksjon av Mirai 2: Toyota News Room:

<https://pressroom.toyota.com/toyota-introduces-second-generation-mirai-fuel-cell-electric-vehicle-as-design-and-technology-flagship-sedan/?fbclid=IwAR2ErBgWr7aWOdJ8V1LSL4jfxFE4oA4VJkie0LdHQlwR6fdxHZTqvplS85w>, besøkt 07.02.2022.

[6]: Tettheten til luft: Wikipedia:

https://en.wikipedia.org/wiki/Density_of_air, besøkt 07.02.2022,

[7]: Vehicle information Mirai 2: Auto-

<https://www.auto-data.net/en/toyota-mirai-ii-1.2-kwh-182hp-fcev-41840>, besøkt 07.02.2021.

[10]: What Makes Fuel Cell Electric Vehicles Safe?: Hyundai motor group:

<https://tech.hyundaimotorgroup.com/article/what-makes-the-fuel-cell-electric-vehicle-safe/>, besøkt 14.05.2022.

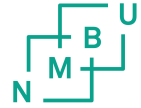
[13]: TechDoc: Toyota sin tekniske database, besøkt våren 2022.



- [14]: Data og informasjon om Mirai 2: Toyota: https://global.toyota/pages/news/images/2020/12/09/1200/20201209_01_02_en.pdf besøkt 02.03.2022.
- [15]: Informasjon om nye Mirai: Toyota: <https://lexusenthusiast.com/forums/threads/second-generation-toyota-mirai.5530/page-9> besøkt 07.03.2022.
- [16]: Transaksel: Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Transaxle>, besøkt 08.03.2022.
- [17]: Informasjon om nye Mirai: Toyota: <https://media.toyota.co.uk/wp-content/uploads/sites/5/pdf/210426M-NG-Mirai-Full-Release.pdf>, besøkt 10.03.2022.
- [22]: Minimum tenningsenergi: Netinbag: <https://www.netinbag.com/no/manufacturing/what-is-minimum-ignition-energy.html>, besøkt 26.03.2022.
- [18]: Om luftkompressoren i Mirai: Toyota: <https://www.toyota-industries.com/news/release/2020/12/10/002895/index.html>, besøkt 11.03.2022.
- [25]: Formel for motoreffekt oppgitt i hestekrefter: E4U: <https://www.electrical4u.net/calculator/torque-nm-to-horsepower-hp-conversion-calculator/>, besøkt 18.04.2022.
- [26]: Antall hestekrefter Mirai 2: Bil Og Motorbloggen: <https://bilogmotorbloggen.no/2020/12/02/toyota-mirai-snart-her/>, besøkt 18.04.2022.
- [27]: Antall hestekrefter Mirai 2: Car And Driver, <https://www.caranddriver.com/toyota/mirai>, besøkt 18.04.2022.
- [28]: Hydrogensatsing: Bellona: <https://bellona.no/nyheter/energi/2021-12-bellona-jubler-for-hydrogen-satsing>, besøkt 29.04.2022.
- [29]: Regjeringens plan om nullutslipp: Regjeringen: https://www.regjeringen.no/no/tema/transport-og-kommunikasjon/veg_og_vegtrafikk/faktaartikler-vei-og-ts/norge-er-elektrisk/id2677481/, besøkt 28.03.2022
- [30]: Om nullutslippsmålene: TØI: <https://www.toi.no/forskningsomrader/transportteknologi-og-miljo/dyrt-og-krevende-men-mulig-a-na-nullutslippsmalene-article36025-1301.html>, besøkt 28.03.2022.
- [31]: Hydrogenstasjon-begrensninger: Statens Vegvesen: <https://www.vegvesen.no/kjoretoy/eie-og-vedlikeholde/kjoretoy-og-drivstoff/drivstoff/>, besøkt 28.03.2022.
- [33]: El-bil nr. 50 000 i Norge: NRK: <https://www.nrk.no/osloogviken/dette-er-elbil-nummer-50-000-1.12319137>, besøkt 28.03.2022.



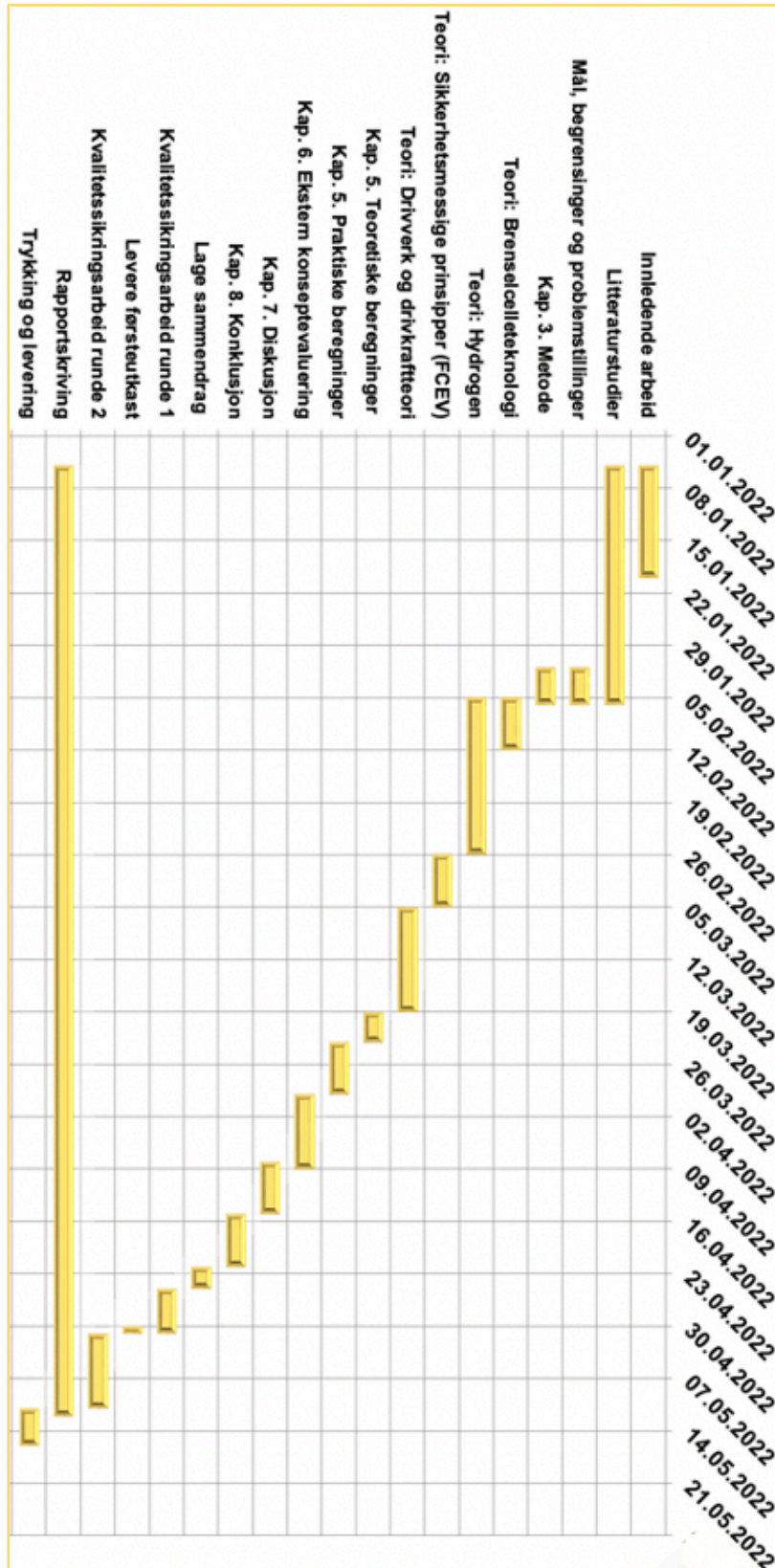
- [34]: Bilparken statistikk: SSB: <https://www.ssb.no/transport-og-reiseliv/landtransport/statistikk/bilparken>, besøkt 28.03.2022.
- [36]: Brensel: SNL: <https://snl.no/brensel>, besøkt 01.04.2022.
- [39]: Alkaliske brenselceller: FuelCellWorks: <https://fuelcellworks.com/knowledge/technologies/afc/>, besøkt 30.03.2022.
- [40]: Direkte metanol brenselceller: FuelCellWorks: <https://fuelcellworks.com/knowledge/technologies/dmfc/>, besøkt 30.03.2022.
- [41]: AFC brenselcellen: FuelCellWorks: <https://www.fuelcellstore.com/blog-section/introduction-alkaline-fuel-cells>, besøkt 30.03.2022.
- [42]: Om «skifted gears» i Mirai 2: Motortrend: <https://www.motortrend.com/reviews/2021-toyota-mirai-long-term-test-review-update-1/>, besøkt 30.04.2022.
- [43]: Kjøpsbetingelser og info om Mirai 2: MOTOR: <https://www.motor.no/tester/motor-test-toyota-mirai-bilen-toyota-vil-at-du-ikke-skal-kjope/195398>, besøkt 30.04.2022.
- [44]: Tekniske spesifikasjoner Hyundai Hexo: Hyundai: <https://www.hyundainews.com/en-us/models/hyundai-nexo-2019-nexo/specifications>, besøkt 01.05.2022
- [45]: Teslas superlader: Tesla: <https://www.tesla.com/support/charging>, besøkt 03.05.2022
- [46]: Spesifikasjoner Tesla S: Wikipedia: (https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_S, besøkt 03.05.2022.
- [47]: Bilde hydrogentank Mirai: Wikimedia Commons: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Toyota_Mirai_high-pressure_hydrogen_tank_SAO_2016_9036.jpg), besøkt 15.05.2022:
- [48]: Yoshika Tanaka sjefingeniør i Toyota om Mirai 2: Toyota: <https://newsroom.toyota.eu/the-new-toyota-mirai/>, besøkt 04.05.2022.
- [49]: Hydrogenproduksjon: World Economic Forum: <https://www.weforum.org/agenda/2021/12/what-is-green-hydrogen-expert-explains-benefits/>, besøkt 04.05.2022.
- [50]: Bilde av hydrogeneksplosjon i Sandvika: <https://www.vg.no/nyheter/innenriks/i/zG9Bxw/eksplosjon-paa-hydrogenstasjon-i-sandvika-svaert-overrasket>, besøkt 04.05.2022
- [51]: Bob S' Massetregnet for hjul: Physics Forum: <https://www.physicsforums.com/threads/rotational-inertia-of-truck-and-trailer.315052/>, besøkt 04.05.2022



- [53]: Vekselretter: <https://www.2soler.no/blog/hva-er-en-inverter>], besøkt 07.05.2022.
- [54]: Motorstyringsenhet: SNL: <https://snl.no/ECU - motor>, besøkt 07.05.2022.
- [55]: Bilde av brenselcellen: CELLIMPACT:
<https://www.cellimpact.com/technology/hydrogen-fuel-cells/>, besøkt 07.05.2022.
- [56] Hydrogenbiler er et polariserende tema: Teknisk Ukeblad:
<https://www.tu.no/artikler/denne-brenselcellen-kan-gjore-hydrogenbiler-tilgjengelig-for-flere/375847>, besøkt 07.05.2022.
- [57]: Om Hyundai Nexa: Norsk Hydrogenforum:
<https://www.hydrogen.no/kjoretoy/hydrogenbiler/hyundai-fe-fuel-cell>, besøkt 07.05.2022.
- [58]: Pris Mirai 2: <https://www.bilnorge.no/artikkel.php?aid=54883>, besøkt 07.05.2022.
- [59]: Ideelle Gasslov: Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Ideal_gas_law, besøkt 07.05.2022.
- [60]: Atomkraft-konsekvenser: <https://www.tu.no/artikler/ikke-noe-gront-skifte-med-kjernekraft/507828>, besøkt 08.05.2022.
- [61]: Differensial: Wikipedia: <https://no.wikipedia.org/wiki/Differensial>, besøkt 08.05.2022.
- [63]: Om Hydrogen: Periodesystemet:
<https://www.periodesystemet.no/grunnstoffer/hydrogen/index.html>, besøkt 11.05.2022.
- [64]: Sammensetning i luft: SNL: <https://snl.no/luft>, besøkt 11.05.2022
- [65]: Monteringsfeil Hydrogeneksplosjon Sandvika: Teknisk Ukeblad:
<https://www.tu.no/artikler/slik-startet-lekkasjen-som-for-te-til-hydrogen-eksplosjonen-i-sandvika/468765>, besøkt 07.03.2022.
- [66]: Hydrogensprøhet: Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_embrittlement, besøkt 08.03.2022.
- [67]: Antistatisk gulv: Floortech: <http://floortech.com/selecting-anti-static-flooring/>, besøkt 11.05.2022.
- [71]: Virkningsgrad Hydrogendreven Brenselcelle: Forskning.no: <https://forskning.no/energi-fornybar-energi-klima/dette-ma-du-vite-om-hydrogen/1359513>, besøkt 15.05.2022.
- [76]: Tekniske spesifikasjoner Mirai 2: Toyota: <https://media.toyota.co.uk/wp-content/uploads/sites/5/pdf/220203M-Mirai-Tech-Spec.pdf>, besøkt 15.05.2022.
- [77] Slik Virker elbil-motoren: Teknisk Ukeblad: <https://www.tu.no/artikler/slik-fungerer-elbil-motoren/276288>, besøkt 16.05.2022.

VEDLEGG

Vedlegg 1, V1: Fremdriftsplan





Vedlegg 2, V2: Mirai 2, spesifikasjoner og tabellverdier [14]

		40		SPECIFICATIONS		New Mirai Main Specifications		
Vehicle Model	Vehicle model	Z		Z		G		
	Vehicle weight	ZBA-JPD20-CEHSS(E)	ZBA-JPD20-CEHSS	ZBA-JPD20-CEHSS(E)	ZBA-JPD20-CEHSS(A)	ZBA-JPD20-CEHSS		
	Gross vehicle weight	1,950*1	1,930*1	1,940	1,920	1,920		
	Minimum turning radius	2,225*1	2,205*1	2,215	2,195	2,195		
	Maximum speed			5.8				
	Performance			175(estimated)				
	Weight							
	Model							
	FC stack	Type	FCB130		FCB130		FCB130	
	Output density	Output density	Polymer electrolyte		Polymer electrolyte		Polymer electrolyte	
Maximum output	Maximum output	5.4(4.4 including end plates)		5.4(4.4 including end plates)		5.4(4.4 including end plates)		
Fuel cells	Fuel cells	128 (174)		128 (174)		128 (174)		
Connection type	Connection type	Serial connection		Serial connection		Serial connection		
Fuel type	Fuel type	Compressed hydrogen		Compressed hydrogen		Compressed hydrogen		
Storage method	Storage method	High-pressure tanks x3		High-pressure tanks x3		High-pressure tanks x3		
Tank capacity	Tank capacity	141 (64 front, 52 center, 25 rear)		141 (64 front, 52 center, 25 rear)		141 (64 front, 52 center, 25 rear)		
Normal working pressure	Normal working pressure	70		70		70		
Motor	Model	3KM		3KM		3KM		
Type	Type	AC synchronous electric generator (permanent magnet synchronous motor)		AC synchronous electric generator (permanent magnet synchronous motor)		AC synchronous electric generator (permanent magnet synchronous motor)		
Rated output	Rated output	48.0		48.0		48.0		
Maximum output (net)	Maximum output (net)	134(182)/6,940		134(182)/6,940		134(182)/6,940		
Maximum torque (net)	Maximum torque (net)	300 (30.6)/0~3,267		300 (30.6)/0~3,267		300 (30.6)/0~3,267		
Drive	Type	Lithium-ion		Lithium-ion		Lithium-ion		
Capacity	Capacity	4.0		4.0		4.0		
Quantity	Quantity	84		84		84		
Connection type	Connection type	Serial connection		Serial connection		Serial connection		
Dimensions	Length/width/height	4,975/1,885/1,470*3		4,975/1,885/1,470		4,975/1,885/1,470		
Wheelbase	Wheelbase	2,920		2,920		2,920		
Track	Track	1,610/1,605		1,610/1,605		1,610/1,605		
Minimum ground clearance*4	Minimum ground clearance*4	155		155		155		
Cabin	Length/width/height*4	1,805/1,595/1,135		1,805/1,595/1,135		1,805/1,595/1,135		
Passengers	Passengers	5		5		5		
Rearranging System	Front/rear	Multi-link coil springs/Multi-link coil springs		Multi-link coil springs/Multi-link coil springs		Multi-link coil springs/Multi-link coil springs		
Brakes	Front/rear	Ventilated disc / Ventilated disc		Ventilated disc / Ventilated disc		Ventilated disc / Ventilated disc		
Drive/line	System	Hydraulic and regenerative braking system		Hydraulic and regenerative braking system		Hydraulic and regenerative braking system		
Reduction ratio	Reduction ratio	Rear-wheel drive		Rear-wheel drive		Rear-wheel drive		
		11.6/1		11.6/1		11.6/1		

*1 Plus 10 kg with panorama roof installed. *2 Distances are calculated by multiplying the effective hydrogen capacity (kg) of the fuel cell vehicle (according to ERS 2 802:2018) by its fuel efficiency in WtC and mode (e.g. Hydrogen capacity for the high-pressure hydrogen tanks depends on the filling capability of each hydrogen station, and fuel efficiency varies depending on usage conditions (weather, traffic congestion, etc.) and driving methods (loaders starts, air conditioning, etc.), so actual cruising range varies. *3 Height 1,480 mm with panorama roof installed. *4 Based on Toyota measurements.

● Fuel efficiency is calculated according to defined test conditions & varies depending on usage conditions (weather, traffic congestion, etc.) and driving methods (loaders starts, air conditioning, etc.). ● WtC (World Harmonized Light Vehicle test Cycle) is an internationally recognized test cycle and is based on average usage rates for urban, suburban, and highway driving. Urban mode assumes relatively non-stop driving influenced by traffic lights and starts/stop, suburban mode assumes driving that is not significantly affected by traffic lights and starts/stop, and highway mode assumes driving on expressways and similar.

Vedlegg 3, V3: Spørreundersøkelse Testpopulasjon

- Spørreundersøkelsen tar for seg mennesker fra 16 år og oppover. Hovedhensikten med spørreundersøkelsen er å kartlegge tanker rundt sikkerheten i hydrogenbiler blant de som enten er i en alder hvor de kan kjøpe og kjøre bil eller at de nærmer seg den alderen.

1. Alder

Alternativ		Kryss
a)	16-29 år	
b)	30-49 år	
c)	50-57 år	
d)	68+ år	

2. Er du skeptisk til å kjøre en bensinbil med tanke på faren for eksplosjon eller brann?

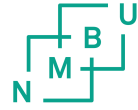
Alternativ		Kryss
a)	I svært liten grad/ikke i det hele tatt	
b)	Til en viss grad	
c)	I stor grad	

3. Er du skeptisk til å kjøre en hydrogenbil med tanke på faren for eksplosjon eller brann?

Alternativ		Kryss
a)	I svært liten grad/ikke i det hele tatt	
b)	Til en viss grad	
c)	I stor grad	

4. I dag finnes det få hydrogenstasjoner i Norge. Ville det påvirket valget ditt til eventuelt å kjøpe hydrogenbil dersom du også kunne fylle hydrogen på alle bensinstasjoner?

Alternativ		Kryss
a)	I svært liten grad/ikke i det hele tatt	
b)	Til en viss grad	
c)	I stor grad	



5. En bil du ønsker å kjøpe viser seg å være en hydrogenbil. Vil du la være å kjøpe bilen?

Alternativ		Kryss
a)	Ja	
b)	Kanskje	
c)	Nei	

6. Hvis svaret var «Ja» eller «Kanskje» på det forrige spørsmålet; Hva er din begrunnelse?

7. Hvilke behov må en hydrogenbil tilfredsstille for at du eventuelt skulle gå over til bruk av hydrogenbil?

8. Eventuelle tilleggs kommentarer

Vedlegg 4: Refleksjonsnotat

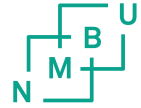
I løpet av våren 2022 har jeg utført en selvstendig mastergradsavhandling hvor jeg individuelt har gjennomført en 30 poengs masteroppgave om drivverk og sikkerhetsmessige prinsipper i kjøretøy med brenselceller. Oppbygningen til masterarbeidet var i stor grad preget av usikkerhet og uro, da ingen oppgaver hittil i utdanningsløpet har vært like krevende når det gjelder krav til selvstendighet. På mange måter har jeg tidligere vært god til å sparre med studievenner og utnyttet muligheten til å kunne diskutere pensum og andre skolerelaterte problemstillinger i kollokviegrupper. I masteroppgaven har jeg måtte tenke annerledes. Jeg har vært nødt til å stole mer på meg selv, være disiplinert og jobbe med diverse problemstillinger på egenhånd. En viktig egenskap jeg har lært innebærer at i møte med diverse problemstillinger, for eksempel: «Hva er egentlig drivverket i Mirai 2?», så skal jeg ikke søke svar ved å henvende meg til nærmeste «ekspert». Jeg har lært å stole på meg selv, ha tålmodighet og forsøke å løse problemstillingen på egenhånd, før jeg så kan henvende meg til en «ekspert» hvor jeg sammenlikner resultatet mitt, med svaret til vedkommende.

Jeg har ved flere tilfeller følt på frustrasjon, da det er mange spørsmål som har dukket opp underveis i prosessen, men som min eminente veileder Geir Terjesen pleide å si til meg: «Husk Shalaw at vi ingeniører, vi lager ikke problemer, vi løser dem. Så kan andre ha ansvaret for å lage dem». Det er mye sannhet og lærdom som ligger i dette. Først og fremst så er det ingen menneskerettighet å få svar på alt vi lur på. Vi kan dog forsøke å løse problemstillinger ved å være kreative. For eksempel så brukte jeg flere dager på å prøve å finne én (!) verdi; massetreghetsmomentet til hjulet til Mirai 2. Da jeg først innså at dette er noe jeg kan estimere ved diverse estimeringsteknikker og heller kommentere at jeg har brukt en estimert verdi, så innså jeg hvor mye tid jeg hadde kastet bort på å være frustrert over at denne verdien ikke var oppgitt.

Et annet moment jeg har innsett er viktigheten av å kartlegge og være bevisst ens egne begrensninger. For eksempel har jeg erfart at jeg er en person som lett kan bli distrauert når jeg jobber hjemmefra. Måten jeg har løst dette på er ved å dra til Drammensbiblioteket og jobbet i et studiemiljø hvor alle rundt meg også fokuserer og er konsentrerte på skolearbeid.

Jeg vil påstå at jeg har blitt et mye mer selvstendig menneske, med sterkere selvillit, selvfølelse og troen på at jeg er klar til å ta arbeidslivet med storm. Tusen takk til Geir Terjesen som har gjort hjulpet meg til å bli en bedre problemløser, ved å gi meg verktøy i form av viktige budskap om hvordan å jobbe effektivt i møte med utfordringer,

Til slutt vil jeg poengtere hvor lærerikt og interessant det har vært å jobbe med fremtidsrettet og potensielt sett svært miljøgunstig teknologi som verden kanskje blir introdusert for i storskala i framtiden.



Vedlegg 5, V5: Datagrunnlag/ benyttede verdier i oppgaven

- Luftmostandskoeffisienten, $C_w = 0,29$ [5]
- Korreksjonsfaktor, $X = 0,86$ [4] → Under [17] så skrytes det av bedre aerodynamikk. Følgelig benytte den 0.86-verdien.
- Sporvidden = $1610 + (1885-1610)/2 = 1747,5$ mm (s.4 i [3])
- Kjøretøyets høyde = 1470 mm (s.4 i [3])
- Luftens tetthet, $\rho_{luft} = 1,225$ kg/m³ [6]
- Rullemotstandskoeffisienten, $f = 0,0076$ [24], gjelder Mirai 1
- Bilens masse (Mirai 2), m_{bil} er mellom 1900 og 1950 kg («Curb weight») altså uten passasjer og bagasje) [7]. Antar derfor en masse på bilen på 1925 kg + passasjer = 75 kg = 2000 kg. => $m = 2000$ kg.
- g: Tyngdeakselerasjon = $9,81$ m/s²
- Hjulradien, $R = 0,34$ m (målt ved hjelp av målebånd)
-
- $I_M = 0,1$ kgm² [38]
- Drivverkets virkningsgrad, $\eta = 0,97$ [38]
- Det totale utvekslingsforholdet, $i_{total} = 11,691$ [76]
- Diverse motordata [V2]
- Maks turtall Mirai 2, $n_M = 16500$ RPM [78]

Vedlegg 6, V6: Utledning estimering av massetregghetsmoment til hjul [74]

Estimering av massetregghetsmoment til hjul utsatt for ren rulling ned et skråplan

Utfør eksperimentet på skråplanet hvor tiden på å tilbakelegge avstanden "s" registreres. Beregn deretter akselerasjonen med bevegelseslikningen:

$$a_x = \frac{2s}{t^2} \quad (1)$$

Massetregghetsmomentet finnes med formelen:

$$I = mR^2 \left(\frac{g \cdot \sin \beta}{a_x} - 1 \right) \quad (2)$$

Utledning av translatorisk akselerasjon i x-retningen:

$$F_x - F_f = m \cdot a_x$$

$$mg \cdot \sin \beta - \frac{M}{R} = ma_x, \text{ friksjonskraften på hjulet : } F_f = \frac{M}{R}$$

$$mg \cdot \sin \beta - \frac{I \cdot a_x}{R^2} = ma_x, \text{ rotasjonsmomentet på hjulet : } M = I \cdot \alpha = I \cdot \frac{a_x}{R}$$

$$mgR^2 \cdot \sin \beta - I \cdot a_x = ma_x R^2$$

$$a_x = \frac{mgR^2 \cdot \sin \beta}{mR^2 + I} \quad (3)$$

Løser vi likning 3 med hensyn på I får vi likning 2.

Symboler:

m: hjulets masse [kg]

I: hjulets massetregghetsmoment [kgm²]

a_x: hjulsenterets akselerasjon i x-retning [m/s²]

α: hjulsenterets vinkelakselerasjon [s⁻²]

v_x: hjulsenterets hastighet i x-retning [m/s]

M: rotasjonsmomentet på hjulet [Nm]

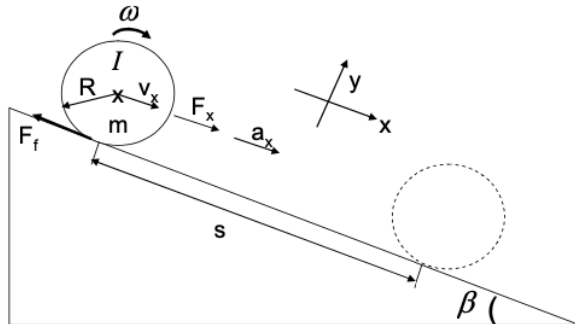
F_x: tyngdens komponent parallelt med skråplanet [N]

F_f: friksjonskraft mellom hjul og underlag [N]

R: hjulradius [m]

β: skråplanets vinkel [°]

g: tyngdens akselerasjon [m/s²]





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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway