

Morten Andersen

Konseptutvikling av drivverk for elektrisk vare sykkel

Masteroppgave i Produktutvikling og produksjon

Veileder: Christer Westum Elverum

Juni 2019

Morten Andersen

Konseptutvikling av drivverk for elektrisk vare sykkel

Masteroppgave i Produktutvikling og produksjon
Veileder: Christer Westum Elverum
Juni 2019

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for maskinteknikk og produksjon

Forord

Dette er en masteroppgave skrevet iløpet av våren 2019 som en avslutning på min utdanning innen produktutvikling og materialer på Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Oppgaven går ut på å finne ulike løsninger for drivverket til en elektrisk sykkel. Oppgaven ble utlyst av transportavdelingen på NTNU som et prosjekt for å finne ut om det var mulig for transportavdelingen å bytte ut en av bilene deres med en elektrisk vare sykkel. Det ble klart at det ville være veldig vanskelig å se på hele designet til sykkelen, så det ble bestemt at det skulle fokuseres på drivverket. Denne oppgaven tar dermed for seg utviklingen av et drivsystem spesiallaget etter transportavdelingens behov.

Oppgaven er skrevet etter retningslinjer fra min veileder og NTNU sin standard for masteroppgave. Denne oppgaven inneholder en undersøkelse av fysiske utfordringer når det kommer til frakt av tung last med en elsykkel og en grundig undersøkelse av hvilke løsninger som allerede eksisterer på markedet. Deretter er oppgaven basert på produktutvikling for å finne det optimale designet for en elsykkel med basis i de utfordringer og løsninger som er oppdaget.

Jeg vil takke min veileder Christer Westum Elverum for at han alltid var tilgjengelig og gav meg veiledningen jeg trengte for å komme meg videre i oppgaven. Jeg vil også takke områdeleder for logistikk, park og ressurs Ragnar Hellan og alle på transportavdelingen for at de var villige til å stille på intervjuer og for at de ga meg et innblikk i hvordan de jobber. Jeg kunne ikke skrevet denne oppgaven uten deres innsikt.

Morten Andersen, 11.06.2019 Trondheim

Sammendrag

Denne masteroppgaven tar for seg den tidlige fasen av en produktutvikling. Omfanget det skal sees på i denne oppgaven er et drivverk til en elsykkel inkludert pedaler, krank, kraftoverføring, gir og motor. Den begynner med en innføring i produktutviklingsteori og hvordan denne teorien kan settes i praksis for dette prosjektet. Det er også grunnleggende teori om gir, moment og kraft for de som trenger en oppfriskning, men det er forventet at leseren kan grunnleggende trigonometri og mekanikk.

Målet med oppgaven er å finne et konsept som oppfyller kundens behov og ønsker når det kommer til designet av drivverket til en elektrisk vare sykkel. Konseptet er begrenset til et godt gjennomtenkt grunnlag basert på utregninger og kunnskap om komponenter til elsykler. Det vil ikke bli tid til å lage fysiske prototyper. Å lage en sykkel med et komplett drivverk er et stort prosjekt som ikke burde påtas uten en klar plan. Sluttresultatet for denne oppgaven skal være et konsept som med stor sikkerhet kan utbedres som en verdifull fysisk prototype. Kunden i denne oppgaven er transportavdelingen på NTNU som gjør ønsker og behov fra kunden sin side lett å avdekke.

Teorien blir først satt i praksis med en undersøkelse for å avdekke hvordan kundens behov vil føre til fysiske problemer som må løses. Eksisterende løsninger blir først utprøvd for å se om det finnes en løsning som kan oppfylle kundens behov med tanke på hvilke utfordringer sykkelene vil møte.

Det vil først utvikles flere hovedkonsepter med ulike virkemåter som kan oppfylle kundens behov. Disse blir sammenlignet og det velges ut et hovedkonsept som blir tatt med videre i oppgaven. I denne oppgaven velges det å se på hvordan startassistenten som lovlig kan kjøre sykkelene i 6km/t kan kombineres med et ekstra gir (assistansegir) med veldig høy utveksling for å få sykkelene opp de bratteste bakkene uten kraft fra syklisten. Dette konseptet blir igjen oppdelt i flere konsepter med forskjellige delløsninger.

Oppgaven konkluderer med hvilket retning de neste stegene i utviklingen bør ta med tanke på valg av komponenter og delløsninger. Forhåpentligvis vil prosjektet tas videre av noen som har mulighet til å bygge videre på konseptet, se på valg av komponenter i detalj-nivå og bygge fungerende prototyper.

Abstract

This master's thesis deals with the early phase of a product development. The scope of this thesis is the drivetrain for an electric bike including pedals, crank, power transmission, gears and motor. It begins with an introduction to product development theory and how this theory can be put into practice for this project. The basic theory of gear, torque and power equations are presented, but it is expected that the reader knows basic trigonometry and mechanics.

The aim of the thesis is to find a concept that meets the customer's needs and desires when it comes to the design of the drivetrain of an electric bike for delivering packages. The concept is limited to a well-thought-out basis based on calculations and knowledge of components for electric bicycles. It will not be time to create physical prototypes. Creating a bike with a complete drivetrain is a big project that should not be taken without a clear plan. The end-result for this thesis is a concept that can with a great certainty be realized as a physical prototype that will yield valuable information. The customer in this project is the transport department at NTNU which makes the needs and desires of the customer easy to uncover.

The theory is first put into practice with a survey to reveal how the customer's needs will lead to physical problems that needs solutions. Existing solutions are first tested to see if there is a solution that can meet the customer's needs. Since there are no existing solutions for bicycle drivetrains that meet the customer's needs the project moves to find new concepts.

First, several main concepts will be developed with different solutions that can meet the customer's needs. These are compared and one of the concepts is selected for future development. In this project it will be examined how the starting assistant, who can legally run the bike at 6km / h by using just a starter such as a button, can be combined with an extra gear (assistance gear) with a very high gear ratio to get the bike up the steepest slopes without any force from the rider. This concept is again divided into several concepts with different sub-solutions.

The task concludes with the direction the next steps in the development should take regarding the choice of components and sub-solutions. Hopefully, the project will be taken forward by someone who can keep developing the concept, look at the selection of the detail-level components and build functioning prototypes.

Innhold

1	Introduksjon	1
1.1	Bakgrunn	1
1.2	Problemstilling	3
1.3	Mål for oppgaven	4
2	Teori	5
2.1	Produktutvikling	5
2.1.1	Agile Stage-gate	5
2.1.2	Set-based design	7
2.1.3	Behovsavdekning	9
2.1.4	Konseptutvikling	10
2.1.5	Konseptvalg	11
2.1.6	Prototyper	12
2.2	Elsykler	13
2.2.1	Lover	13
2.2.2	Elektriske motorer	15
2.2.3	Moment og gir	17
3	Metode	20
3.1	Agile set-based design	20
3.2	Fuzzy front-end	21
3.3	Kundebehov	22
3.3.1	Intervju	23
3.4	Konseptutvikling	23
3.5	Valg av konsept	24
4	Problemundersøkelse og konseptutvikling	25
4.1	Behov	25
4.1.1	Oppsummert kundebehov	28
4.2	Problemundersøkelse	29
4.2.1	Friksjon og fremdrift	29
4.2.2	Helning og hindringer	32
4.2.3	Mulig vekt og plassering av last på sykkelen	36
4.2.4	Moment fra motor	40
4.2.5	Moment fra syklist	40
4.2.6	Tilstrekkelig fart og akselerasjon	41
4.2.7	Nødvendig utveksling og girspekter	43
4.3	Eksisterende løsninger	44

4.3.1	Avhoppsgir	44
4.3.2	Navgir	45
4.3.3	Girkasse	46
4.3.4	Pinion	49
4.3.5	Plassering av motor	52
4.3.6	Differensial	52
4.3.7	Antispinn	52
4.3.8	Moment- eller rotasjonssensor	53
4.4	Fremgangsmåte for konseptvalg	53
4.5	Design for transportavdelingen	58
4.6	Valg av konsepter for videre utvikling	67
4.6.1	Konsept til neste fase	69
5	Videre utvikling	70
5.1	Begrensninger	70
5.2	Plassering av motor	72
5.3	Styring av fart og akselerasjon	72
5.4	Type gir	73
5.4.1	Avhoppsgir	73
5.4.2	CVT - trinnløst gir	74
5.4.3	Planetgir	74
5.4.4	Tannhjul på akslinger	75
5.5	Automatisk eller manuelt gir	75
5.6	Sikkerhet	76
5.7	Kjede eller kardang	76
5.8	Motorkontroll	77
5.9	Konsept 1: Konstruer et eget gir som kun brukes i samarbeid med startassistansen	78
5.9.1	Girbytter på et enkelt planetgir	79
5.10	Konsept 2: Girkasse med et bredt spektrum	79
5.11	Diskusjon	80
6	Konklusjon	82
6.1	Videre arbeid	82

Figurer

1	Kart med plassering av postsentral og Gløshaugen	2
2	Skapene som skal bli plassert i byggene på Gløshaugen.	3
3	Faser i et produktutviklingsprosjekt. Bildet er hentet fra 'Product design and development' av Ulrich og Eppinger side 9 [5].	6
4	Eksempel på bruk av graf for å holde oversikt over to forskjellige variabler og hvilken 'trade-off' designendringer skaper fra 'Product design and development' side 108 [5]	8
5	Eksempel på hvordan flere konsepter blir redusert til en optimal løsning, og hvordan det å velge et konsept tidlig kan føre til mye tapt arbeid og sette prosjektet langt tilbake[8].	9
6	Matrise for å rangere konsepter. Denne matrisen har med en vektlegging på hvor viktig hvert behov er (weighted score) og velgerne gir en verdi fra 1 til 5 hvor 3 er like godt som referansekonseptet [5]. Bildet er hentet fra 'Product Design and Development' av Ulrich og Eppinger side 154.	12
7	Regelverk for sykler fra statens vegvesen [14]	14
8	Illustrasjon av en enkel BLDC motor med en rototr med permanentmagneter i senter og en stator med viklinger rundt. Skjematikken til høyre viser hvordan ladningene i viklingene bytter fra pluss til minus til av for å lage et roterende magnetfelt som drar rotoren rundt [15].	15
9	Fra venstre: krankmotor, navmotor i fronthjul og navmotor i bakhjul [17]	16
10	Ligninger for moment på en plate som roterer om en aksling i senter	17
11	Avhoppsgir med moment (blått), radius (grønt) og kraft (rødt). Momentet fra syklist som trækker er M_1 , kraften F er M_1 ganger r_1 som blir overført vi kjede til giret bak og momentet på bakhjulet M_2 tilsvarer F ganger r_2 [18]	18
12	Endring av moment (venstre) og fart (høyre) ved konstant r_1 og økende r_2	19
13	Enkel skisse av et planetgir [20]	19
14	Illustrasjon på hvordan rekognosering kan fungere i et prosjekt [21]	21
15	Bur som blir brukt på sentralen. Dimensjoner: 74x150x113 cm	26
16	Oppbyggingen av en differensial ([24]). For en sykkel kan kjede eller reim benyttes for å drive kronhjulet.	27
17	Eksempel av differensial på en trehjuls sykkel hvor kjedet blir brukt til å drive kronhjulet ([25]).	27

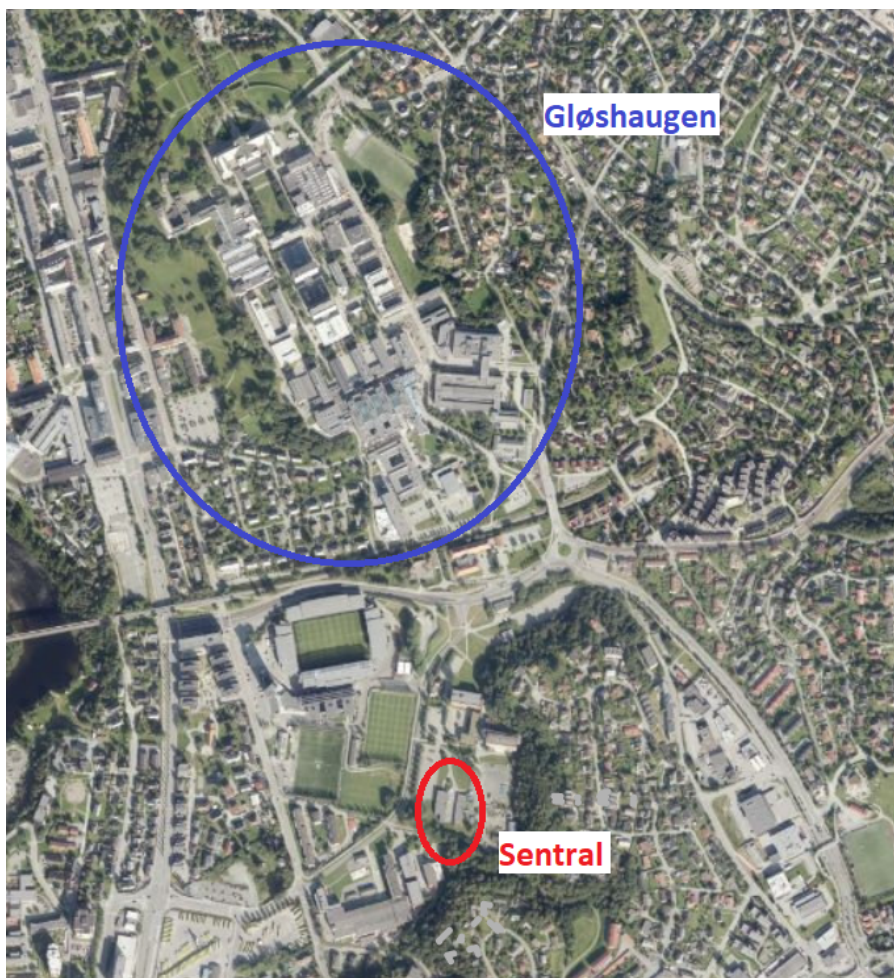
18	Bilde av en Radkutsche Muskietier sykkel med en ekstra tilhenger tilkoblet. Dette designet ble valgt ut av transportavdelingen fra en samling av eksempler på forskjellige designløsninger for varesykler.	28
19	Hvordan friksjonskraften endres når ytre krefter overvinner den statiske friksjonen[26].	30
20	Tegning for å vise krefter og moment for en sykkel i en bakke. Momentet på forhjulet vil kun være med med en motor i fronthjulet. F_r er friksjonskraften fra hjulet som dytter sykkelen fremover.	33
21	Når et hjul møter en kant vil det tilsvare en veldig bratt bakke. Stigningen vil tilsvare: $\theta = \arccos(1 - (r/h))$	34
22	Stigningen θ blir mindre når hjulet beveger seg opp kanten.	34
23	Situasjonen når forhjulet treffer kanten.	34
24	Situasjonen når bakhjulet treffer kanten. F_N tilsvarer $F_l * \cos(\theta)$ og $F_t = F_b = F_l * \sin(\theta)$ hvor θ er vinkelen mellom tangenten og horisontalen.	35
25	Situasjonen når et hjul som treffer en kant har et moment om akslingen og en kraft som dytter på akslingen.	36
26	Sykkel forenklet til en bjelke opplagret i sykkelens akslinger. F_l er tyngden av lasten over bakakslingen, F_e er sykkelens egenvekt, F_s er tyngden av sykliste og N_b og N_f er normalkreftene på bakhjulet og fronthjulet.	37
27	Sykkel i bakke med last som kan tippe sykkelen bakover.	38
28	Forenkling av sykkel belastet med last over bakaksling, vekt fra syklist og egenvekten for en sykkel på flatt underlag.	38
29	Forenkling av sykkel belastet med last over bakaksling, vekt fra syklist og egenvekten for en sykkel på et underlag med helning.	38
30	Hvordan momentet endres fra pedalen er på topp av rotasjonene til den er på bunn. Maksimalt moment oppstår når pedalen står vannrett (vinkel lik 0).	41
31	Eksempel på et gir med r_1 ved kranken og r_2 på bakhjul[18]	43
32	Girskiftet på bakhjulet for et avhoppsgir[32]	45
33	Oppbygningen til er trinnløst NuVinci gir laget av Fallbrook technologies [33]. Giret endrer utvekslingen ved å ha pådrag fra syklisten og kraftutvekslingen til hjulet på forskjellige punkter av en ball med forskjellig radius i forhold til akslingen gjennom ballen. Ved å endre vinkelen på ballens aksling endres forholdet mellom radiusene og gir en utveksling på $\frac{r_{ut}}{r_{inn}}$	46
34	Manuell girkasse for biler[34]	47
35	Virkemåten til en synkronenhet[34]	48

36	Snitt av en automatisk girkasse for en bil[35].	48
37	Delsnitt av et Pinion gir[36]. Kraften blir overført fra den lyseste blå akslingen som er koblet til pedalene til den andre akslingen som er en mørkere blå, og til sist til det ytre tannhjul ved hjelp av et indre tannhjul farget mørkeblåt	49
38	Tannhjul inne i en Pinion girkasse. De tre til venstre er koblet til utgangen, mens de seks til høyre er koblet til akslingen drevet av pedalene[36]	50
39	Tannhjulene på de nederste akslingene (den til venstre ligger utenpå den andre) sitter fast i akslingene. De øverste blir valgt med tapper som blir dyttet ut av girmekanismen på innsiden av akslingen[36] .	50
40	Spesifikasjonene til Pinion sine gir[36]	51
41	Forenkling av vekt plasser på sykkel som står i en bakke.	54
42	Forenkling av krefter og moment på sykkelhjulene.	54
43	Eksempel på plassering av tyngdepunkt i forhold til en av akslingene.	55
44	Designet transportavdelingen selv valgte fra en gruppe eksempler[37]. Denne versjonen av Muskitier sykkel er utrustet med et lasteplan som er 150cm langt.	59
45	Tegning for å vise krefter som påvirker en sykkel lignende Musketier.	59
46	Fordeling av vekt på en sykkel med mål beregnet fra figur ??	61
47	Matrise for konseptvalg. Konsept 1: Flytte spekteret ved å bytte tannhjul. Konsept 2: Kjøre 5m uten å måtte trække. Konsept 3: Lage et gir med et veldig stort spekter. Konsept 4: Bruke startassistanse sammen med et eget assistansegir.	69
48	Bafang motor og navgir med kardangdrift [43]	77

1 Introduksjon

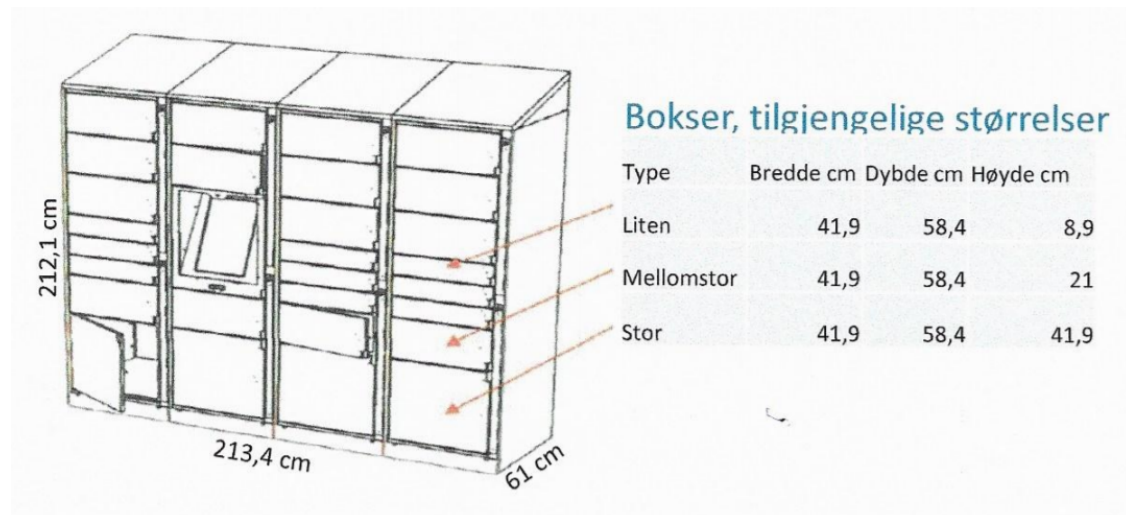
1.1 Bakgrunn

Denne oppgaven skrives fordi driftsavdelingen på NTNU i Trondheim ønsker å undersøke muligheten for å kunne utvikle en elsykkel til levering av post og pakker. Ideen er inspirert av den økte bruken av elsykler til varetransport i blant annet Oslo, Bergen og Trondheim [1]. Økt satsing på sykkelveier og kollektivtransport fra kommunen sin side vil gjøre det enklere for syklister å ferdes i byen. I den nasjonale transportplanen 2018-2029 fra samferdselsdepartementet gies det stor oppmerksomhet til bedre forhold for syklister med store investeringer på et nasjonalt plan, og spesielt i storbyene [2]. Trondheim kommune har sammen med statens vegvesen og Sør-Trøndelag fylkeskommune utviklet en sykkelstrategi for hvordan det skal legges mer til rette for syklister i perioden 2014-2025. Det vil bli økt satsing på utbygging av sykkelveier for å bedre effektiviteten og sikkerheten ved bruk av sykkel, og det har allerede blitt bygget nye sykkelveier på Gløshaugen campus som er avskilt fra bilvei og fortau [3]. Driftsavdelingen bruker elektriske biler som er stillegående og miljøvennlige. Men de tar stor plass, spesielt inne på Gløshaugen campus, og de bidrar like mye til biltrafikken og svevestøv som biler på fossilt brennstoff. De elektriske bilene må også, i motsetning til elsykler, følge bilveiene som fører til lenger reisevei og mer trafikk. Bilene må også finne plasser å parkere uten å blokkere både harde og myke trafikanter inne på campus hvor de skal levere post. En elsykkel vil ta mindre plass og trenger ikke å stå på godkjente parkeringsplasser som gjør at de vil kunne stå nærmere leveringssteder og de må ikke lete etter ledige parkeringsplasser. Pakkene skal leveres til flere forskjellige bygg inne på campus som betyr flere raske stopp på steder med få steder å parkere og et krokete veisystem for biler med flere gågater enn bilveier. En elsykkel vil slippe å følge bilveier og dermed også slippe å omgå busser og andre trafikanter, og vil være en mye mer stabil leveringsmåte med tanke på veiarbeid, ulykker og andre ting som kan stanse biltrafikken. Den store satsingen på sykkelveier gjør også at de i større og større grad slipper å dele veien med fotgjengere.



Figur 1: Kart med plassering av postsentral og Gløshaugen

Det skal opprettes et nytt system for levering av pakker. Det skal settes opp post-sentraler på byggene som er skap hvor pakker kan leveres og registreres slik at mottakerene får automatisk beskjed om at pakken ligger i skapet. Dette skal effektivisere leveringen da sjåføren ikke trenger å finne hver mottaker. Dette er for å effektivisere leveringene, og en elsykkel kan være med på å effektivisere ytterligere. Det vil fortsatt være mulig å få levert pakker som ikke passer inn i skapet direkte til mottakeren. Det blir den dag i dag bruk en Nissan e-NV200 som er en elektrisk varebil til postlevering. Det er en av disse bilene sykkelen eventuelt kan ta over for.



Figur 2: Skapene som skal bli plassert i byggene på Gløshaugen.

Løsninger for hvordan de forskjellige delene av en sykkel kan designes har blitt mangedoblet de siste årene, mye som følge av økt popularitet for sykler på grunn av miljøinitiativ, økt befolkningstetthet og tilgjengeligheten til elektriske sykler. Denne oppgaven vil se på alternativer til kraftoverføringer. Valg vil bli tatt med tanke på at sykkelen skal kunne i størst mulig grad kunne ta over en av rutene til driftsavdelingen på NTNU som kjører mellom postsentralen og Gløshaugen campus.

1.2 Problemstilling

Etter samtaler med transportavdelingen kom det fram at det ikke er noen spesielle krav til størrelse, sittestilling, utforming, og lignende. Det som er viktig er at sykkelen kan takle utfordringene som vil møte sykkelen på reiseveien, og at den er sikker med tanke på last, syklist og andre trafikanter, spesielt myke trafikanter som andre syklist og fotgjengere. Dette gjør drivverket, bremsene og styring de viktigste komponentene da sykkelen må komme seg fram under alle forhold og kunne stoppe og svinge på en sikker måte i alle situasjoner. Det finnes mange forskjellige løsninger for styring og brems, men de aller fleste sykler bruker fortsatt kjeder eller reim med enten avhoppsgir eller navgir. Da denne oppgaven må spesifiseres på grunn av tilgjengelig tid og ressurser vil kun drivverket bli sett på i denne oppgaven. Valget falt på drivverket da det viste seg at det ikke fantes elsykler på markedet som var spesiallaget for veldig tung last og bratte bakker som ville blir et stort problem for transportavdelingen til NTNU.

Problemstilling: Utvikle et konsept for drivverket på en elsykkel med tilstrekkelig høyt moment til å frakte tung last opp bakker og over hindringer uten at syklisten må bruke mye krefter og uten at det går utover muligheten til å oppnå en tilferdsstillende fart.

1.3 Mål for oppgaven

Målet med denne oppgaven er å finne en løsning for drivsystemet som øker momentet fra pedalene og motoren til hjulene tilstrekkelig for at sykkelen skal kunne komme seg opp bakker og over hindringer med tung last uten at syklisten trenger å anstrenge seg. Det er også viktig at sykkelen kan komme opp i tilstrekkelig høy fart slik at leveringstiden ikke blir for lang. Det skal utvikles konsept for hele drivverket med motorer, krank, pedaler, gir og kraftoverføringer. Konseptet skal utvikles slik at de kan legges fram til kunden og eventuelt en produsent for videre utvikling.

2 Teori

Dette kapitlet tar for seg teorien bak fremgangsmåten til effektiv produktutvikling som legger grunnlaget for metode kapitlet. Det er også med teori om elektriske motorer, moment, gir og friksjon. I denne delen vil det kun være basiskunnskap som er nødvendig for å forstå utregningene som kommer senere i oppgaven.

2.1 Produktutvikling

2.1.1 Agile Stage-gate

'Stage-gate' er navnet på et type system for prosjektstyring i utviklingsprosjekter. Utviklingen blir oppdelt i faser med porter som skiller dem. Når utviklingen er innenfor en fase skal hele oppmerksomheten tildeles de arbeidsoppgavene og mål som er plassert i denne fasen. Fasene er avskilt med porter som hovedsakelig bare skal brukes i en retning. Når en fase er fullført skal utviklerne i størst mulig grad legge fra seg alle arbeidsoppgaver og spørsmål som tilhører den fullførte fasen og bevege prosjektet videre[4].

Oppdelingen av prosjektet følger i stor grad de fasene som blir foreslått av Ulrich og Eppinger i boken 'Product Design and Development'[5]. I denne oppgaven skal det kun utvikles konsepter, så dette prosjektet vil ikke gå lenger enn fase 3.

Grunnen til å dele opp utviklingen i faser er for å sikre effektiv fremgang ved å skille ut arbeidsoppgaver, sette dem i riktig rekkefølge og ved å sette mål for hver fase. Hver fase burde ha et begrenset antall arbeidsoppgaver og en tidsfrist for ferdigstillelse[6].

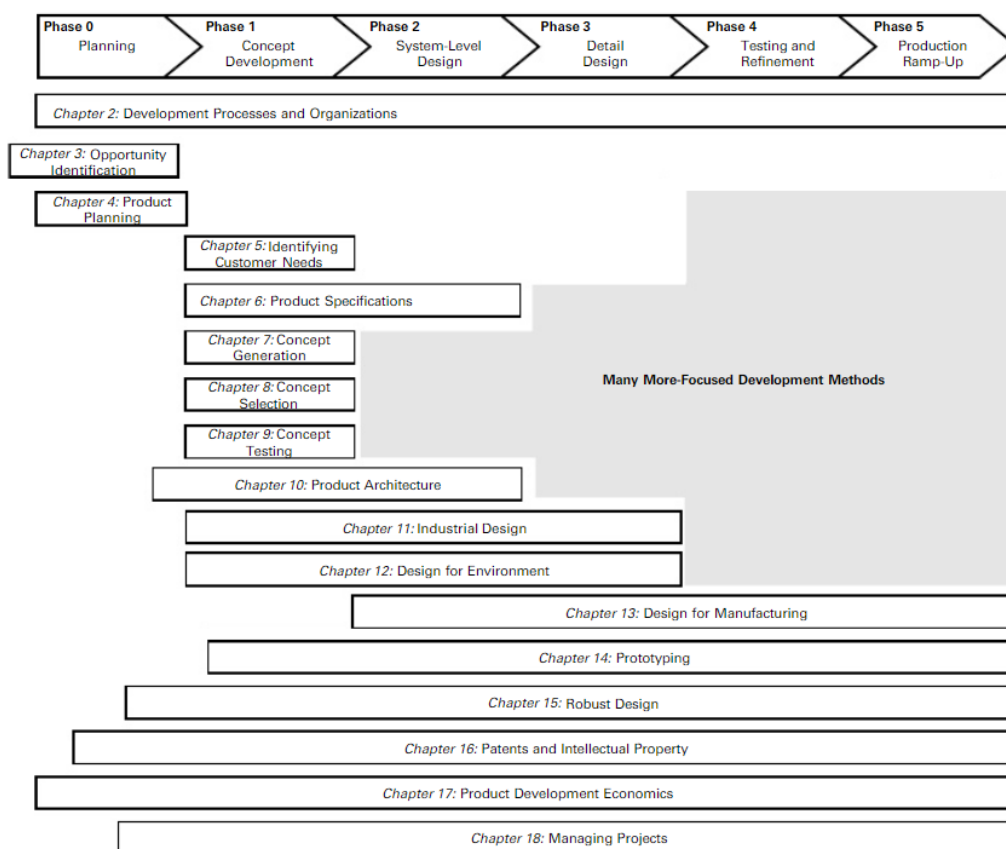


EXHIBIT 1-4 The product development process. The diagram shows where each of the integrative methods presented in the remaining chapters is most applicable.

Figur 3: Faser i et produktutviklingsprosjekt. Bildet er hentet fra 'Product design and development' av Ulrich og Eppinger side 9 [5].

'Agile' (direkte oversatt: smidighet) betyr at prosessen er bevegelig både fremover og bakover. Prosjektet kan bevegges tilbake til tidligere faser om det viser seg at disse kunne vært gjennomført bedre. Høyst sannsynlig kan en utvikler lære mye av etterpåklokskapen som kommer av å bygge videre på løsninger og teste designvalg i nye mer vel utviklede versjoner med flere kundegrupper som f.eks. fabrikant og distributør. Et konsept som er veldig lovende i en tidlig fase kan vise seg å ha flere mangler ved ettersyn og testing av prototyper. Er det mulig å foreta endringer på konseptet istedet for å begynne konseptutviklingen på nytt vil dette være mest kostnadseffektive for øyeblikket, men endringer av eksisterende design kan komme til et punkt hvor endringene må gå utover hovedfunksjonen og vil derfor ikke være en reel løsning lenger. Det betyr at alle ressursene som har blitt lagt i utviklingen av konseptet kan gå tapt hvis det ikke er mulig for utviklerene å lære av sine feil og mangler. Får utviklerene mulighet til å bruke den nye kunnskapen i en ny iterasjon

av konseptutviklingen kan sluttresultatet bli mye bedre enn et konsept som blir tvunget videre i prosessen etter at det er konstatert mangler i løsningen[7].

For å få til best mulig kvalitet for produktet kan etterpåklokskap og sen læring bli utnyttet ved å tilrettelegge for flere gjennomkjøringer av noen av fasene. Å ha flere iterasjoner kan gjøre at utviklerene har mulighet til å se på tidligere spørsmål og problemer med nytt syn og bedre forståelse for hvilke implikasjoner visse valg har senere i utviklingen. Det er også mulig å ha et visst overlapp mellom fasene for å raskt fikse åpenbare problemer med designet som viser seg når prosjektet tas et steg videre[6].

2.1.2 Set-based design

For å optimalisere læring, kvalitet og for å minske risiko i prosjektet kan det brukes flere konsepter som blir utviklet parallelt. Ved å ha flere konsepter som blir utviklet samtidig er det mulig å lære ting som ikke ville kommet fram ved å bare ha ett konsept. Forkastede konsepter kan vise seg å ha smarte løsninger når det kommer til detaljdesignet som kan komme til nytte i andre prosjekter. Velges et konsept tidlig for videreutvikling vil usikkerheten i prosjektet øke drastisk med tiden ettersom det blir brukt mer og mer ressurser på konseptet, som vil tilsvare et stort tap om konseptet til slutt feiler [7]. I løpet av et prosjekt øker kunnskapen rundt problemer og løsninger med brukt tid og arbeid. Ofte kan viktig kunnskap som gjør at det må foretas store endringer på konseptet komme seint i prosjektet hvor det ikke er nok tid eller ressurser igjen til å foreta nødvendige endringer[7].

Ofte vil endringer i designet føre til at flere verdier endrer seg. Noen ganger vil en endring ha en positiv effekt på en verdi og en negativ effekt på en annen. Dette kalles en 'trade-off', der det må velges et aspekt over et annet. Et eksempel kan være å øke tversnittet på rammen som vil gjøre den sterkere som er positivt, men vekten og størrelsen vil også øke som kan være negativt. Det er viktig å fokusere på helheten, og ikke bli for opphengt i kun ett aspekt. Istedenfor å ha satte verdier som mål brukes et sett med verdier som kan fungere. For de aller fleste produkter er det hemmende å sette harde verdier som mål når det i virkeligheten er et spekter av verdier som ville fungert[6]. Ved å utvikle flere konsepter og prototyper, undersøke produksjonsmuligheter og finne optimale kompromisser mellom sammenhengende verdier med tanke på kundens behov og ønsker kan spekteret snevres inn til endelige verdier som vil gi den optimale helheten[7].

For å ha oversikt over den totale effekten av forskjellige designløsninger er det mulig å bruke grafer som holder oversikt over to forskjellige verdier. For å visualisere spekteret med akseptable verdier og optimale kompromisser brukes et areal som en grense for akseptable verdier, og muligens ideele verdier.

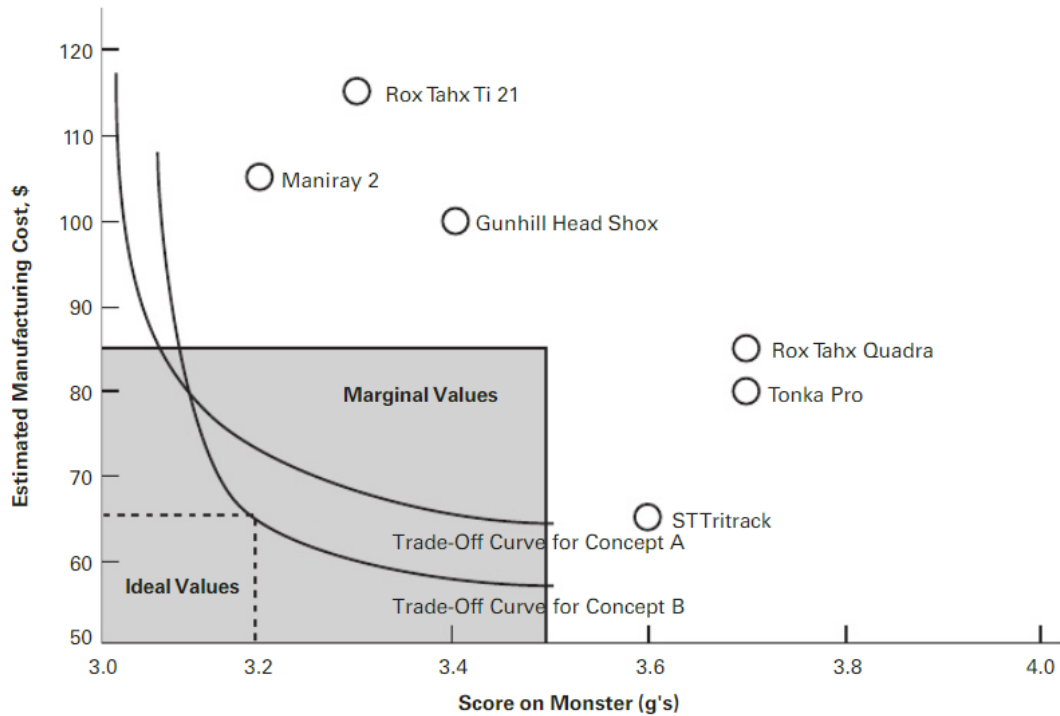
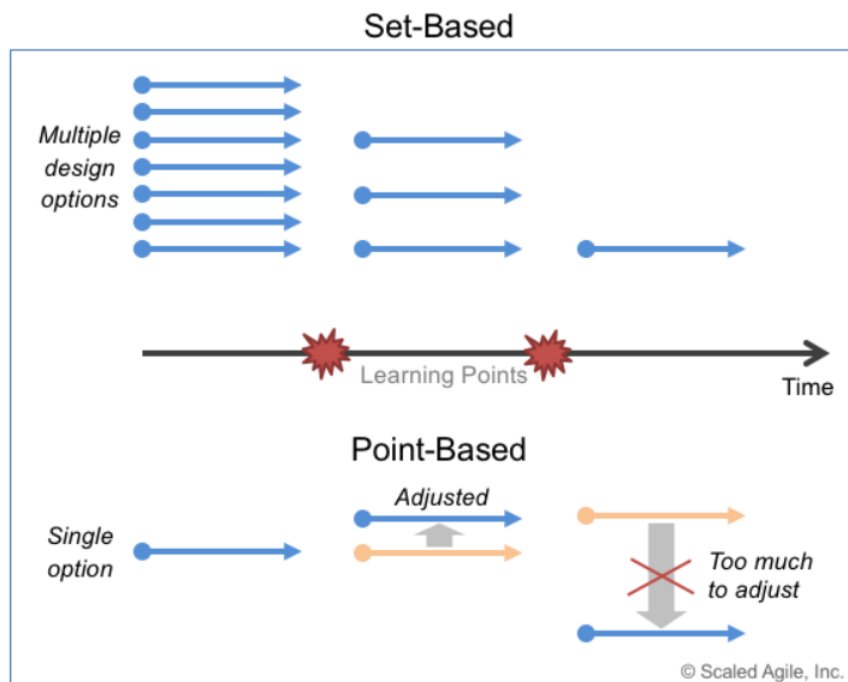


EXHIBIT 6-11 A competitive map showing estimated manufacturing cost versus score on the Monster test. Trade-off curves for two suspension concepts are also drawn on this map.

Figur 4: Eksempel på bruk av graf for å holde oversikt over to forskjellige variabler og hvilken 'trade-off' designendringer skaper fra 'Product design and development' side 108 [5]

Etterhvert som utviklingen går videre vil konseptene bli testet etter strengere og nye krav, og opp imot hverandre til det kun står ett igjen. Om det viser seg at dette konseptet ikke vil fungere i en enda senere fase kan prosjektet plukke opp igjen et annet konsept som allerede har kommet et stykke i utviklingen.



Figur 5: Eksempel på hvordan flere konsepter blir redusert til en optimal løsning, og hvordan det å velge et konsept tidlig kan føre til mye tapt arbeid og sette prosjektet langt tilbake[8].

2.1.3 Behovsavdekning

For å kunne ta riktige avgjørelser når det gjelder å velge mellom konsepter som har forskjellige styrker er det viktig å være klar over hvilke faktorer som er viktigst for kunden[5]. Utviklere kan fort blir opphengt i sine egne ideer og ønsker for et produkt, så det er viktig å alltid være klar over hvilke behov som faktisk er viktige og hvilke som bare virker viktige[9]. Det er mange måter å avdekke kundebehov. Den mest åpenbare er å få ett sett krav fra kunden, men dette vil ofte føre til en utvikling med unødvendige begrensninger og mangelfull innsikt. For et godt grunnlag til videre utvikling bør det foretas samtaler, intervjuer, observasjoner og eksperimenter for å avdekke behov som ikke er åpenbare for både kunden og utvikleren, og for å finne begrensninger som er reelle og gir utvikleren rom til innovasjon[5].

For å virkelig forstå kundens problemer, behov og prioriteringer er det viktig å kunne sette seg inn i deres situasjon. Om det skal utvikles et produkt til en spesiell aktivitet vil det mest effektive være at utvikleren bruker tid på å gjøre dette selv. Eventuelt kan utvikler bli med for å observere brukeren mens de foretar aktiviteten.

Ofte vil det være mange variasjoner i aktiviteten som ikke blir avdekket med en eller få observasjoner. For detaljdesignet er det viktig at utvikleren har kunnskap om hvordan designet vil fungere i alle mulige variasjoner av bruksområder.

Ulrich og Eppinger foreslår fem steg for å samle behov og sette de i system[5]:

1. Samle rådata fra kunden
2. Tølge rådataen
3. Organiser et hierarki med førstegrads-, andregrads- og om nødvendig tredjegrads-behov
4. Bestem hvor viktige de forskjellige behovene er
5. Reflekter over resultatene og prosessen

2.1.4 Konseptutvikling

Et produktkonsept er en beskrivelse av teknologien, virkemåten og utformingen av produktet, og hvordan produktet tilfredsstiller brukerens ønsker og behov. Et konsept vil tilsvare en tegning og muligens en 3D modell, og en kort beskrivelse av produktet. Konseptutvikling kan skje raskt og flere konsepter kan genereres uten store kostnader[8]. Kundens ønsker og behov ligger i grunn i konseptutviklingen og konsepter må bygges ifra disse om sluttproduktet skal oppfylle kundens krav[5]. Selv om det genereres mange konsepter raskt bør ikke prosjektet gå videre før den tildelte tiden er brukt opp eller utviklerne er sikre på at de har gått tom for ideer. Når et konsept blir valgt og utviklet videre vil det føre til mer og mer kostnader for utviklerne med tanke på tid og penger. Prototyper og forskning investert i et prosjekt øker med tiden så det er veldig viktig at konseptene de er basert på har et godt grunnlag og ikke må endres sent i prosjektet[7].

Ulrich og Eppinger foreslår fem steg for konseptutvikling. Disse skal gjøres i rekkefølge, men prosessen kan gjentas flere ganger for et konsept[5].

- 1: Avklar problemer og del hovedproblemer inn i delproblemer
- 2: Let etter løsninger hos konkurrenter
- 3: Finn løsninger internt i teamet ved hjelp av 'brainstorming'
- 4: Utforsk mulige løsninger systematisk for delproblemer og hovedproblemer
- 5: Reflekter over prosessen

Vanlige fallgruver for prosjekter er å ikke utforske eksisterende løsninger fra konkurrenter godt nok, bruke ressurser på delvise løsninger som er lovende i seg selv men

som ikke passer med helheten og å ikke greie å se en hel ny kategori med løsninger[5]. Det er også andre vanlige fallgruver med tanke på hvordan et utviklingsteam jobber sammen, men disse er ikke relevante for denne oppgaven.

2.1.5 Konseptvalg

Konsept for videre utvikling må først og fremst velges med tanke på kundens behov. De konseptene som oppfyller flest mulig og de viktigste av kundens krav blir prioritert. Det kan også være andre aspekter som for eksempel kostnad, hvor lett konseptet er å produsere, hvor lik konseptet er til produkter fra konkurrenter, etc. Selve utvelgelsen kan foretas på mange forskjellige måter med forskjellige grunnlag for hvert prosjekt. Valget kan tas internt i utviklingsteamet ved avstemning, diskusjon eller av et utvalgt medlem med ekstra god innsikt. Eller så kan valget bli eksportert til en ekstern velger som kunden eller noen høyere opp i systemet. Det kan også foretas spørreundersøkelser som rangerer de forskjellige konseptene. Om det er mulig kan det også lages enkle prototyper for å hjelpe vurderingen[5].

Det kan også bli brukt metoder med matriser for prosjekter med kompliserte kundebehov og flere lovende konsept. Fremgangsmåten er hentet fra Ulrich og Eppinger[5].

- 1: Preparer en matrise med kundebehov og et referansekonsept
- 2: Vurder hvert konsept opp mot referansekonseptet og gi poeng for hvert behov.
- 3: Ranger konseptene etter poengsum
- 4: Kombiner og forbedre konseptene
- 5: Velg ett eller flere konsepter å gå videre med
- 6: Reflekter over prosessen

Det kan foretas flere iterasjoner av denne prosessen med forskjellige poengsystemer. Konseptene får poeng for hvor godt de oppfyller diverse kundebehov i forhold til et referansekonsept. For å spare tid kan den første iterasjonen kun se om konseptet er dårligere, like godt eller bedre enn referansen. Dette vil luke ut de konseptene som ikke trenger bedre ettersyn. De gjenstående konseptene kan gå igjennom prosessen på nytt med et mer detaljert poengsystem, hvor hvert behov blir vektlagt for hvor viktig den er. Konseptene blir rangert etter summen av alle poengene ganger den tilhørende vekten[5].

		Concept							
		A (Reference) Master Cylinder		DF Lever Stop		E Swash Ring		G+ Dial Screw+	
Selection Criteria	Weight	Rating	Weighted Score	Rating	Weighted Score	Rating	Weighted Score	Rating	Weighted Score
Ease of handling	5%	3	0.15	3	0.15	4	0.2	4	0.2
Ease of use	15%	3	0.45	4	0.6	4	0.6	3	0.45
Readability of settings	10%	2	0.2	3	0.3	5	0.5	5	0.5
Dose metering accuracy	25%	3	0.75	3	0.75	2	0.5	3	0.75
Durability	15%	2	0.3	5	0.75	4	0.6	3	0.45
Ease of manufacture	20%	3	0.6	3	0.6	2	0.4	2	0.4
Portability	10%	3	0.3	3	0.3	3	0.3	3	0.3
Total Score		2.75		3.45		3.10		3.05	
Rank		4		1		2		3	
Continue?		No		Develop		No		No	

EXHIBIT 8-7 The concept-scoring matrix. This method uses a weighted sum of the ratings to determine concept ranking. While concept A serves as the overall reference concept, the separate reference points for each criterion are signified by **bold** rating values.

Figur 6: Matrise for å rangere konsepter. Denne matrisen har med en vektlegging på hvor viktig hvert behov er (weighted score) og velgerne gir en verdi fra 1 til 5 hvor 3 er like godt som referansekonseptet [5]. Bildet er hentet fra 'Product Design and Development' av Ulrich og Eppinger side 154.

2.1.6 Prototyper

Prototyper er viktige for å få oversikt over ideer, teste løsninger og samle kunnskap. Prototyper kan være alt ifra skisser og maskintegninger til fysiske produkter som ser ut som og oppfører seg som det ferdige produktet. For å få til en effektiv prosess bør det brukes raske metoder for å teste løsninger. Det er ikke lurt å bygge den første prototypen med tidskrevende metoder som maskinering eller 3D-printer hvis løsningen kan testes ved å lage en prototype av papp, papir, teip, lim eller lignende som kan belyse problemer og forbedringer raskt og effektivt. Prototyper bør utføres i iterasjoner hvor den neste iterasjonen er en forbedring av den forrige eller en mer fullverdig versjon med tanke på et ferdig produkt[10].

Det er visse ting som ikke vil vise seg ved å lage tegninger, CAD-modeller og simuleringer. Det er viktig å utvikle ideer fra det teoretiske til det praktiske før beslutninger om en endelig løsning blir tatt. Det er vanskelig å vite hvordan et produkt er å montere og bruke utifra tegninger og datasimuleringer. Kunder og andre som skal teste produktet er ikke nødvendigvis opplært i maskintegning og CAD simulering som betyr at de ofte kan misforstå eller ikke skjønne hvordan produktet

faktisk fungerer. Produkter må lages for kunden, og utviklere må huske at de ikke er fasiten på hvilket design som er best. En fysisk prototype som kan puttes i kundens hender for testing uten innsikt i virkemåte kan åpne for bedre tilbakemeldinger da utvikleren ikke kan forklare baktanker og i værste fall glorifisere konseptet.

2.2 Elsykler

Denne delen av teorien tar for seg viktige grunnkunnskaper om elsykler, lover og hvordan gir fungerer. Dette vil lage mye av grunnlaget for konseptutviklingen da sykkelen må kunne brukes overalt på norske veier. Teorien om gir og hvordan giret påvirker moment og fart er grunnleggende for å forstå utregningene i oppgaven.

2.2.1 Lover

Statens vegvesen betegner 'sykkel' som en gruppe kjøretøy inndelt i 'vanlige sykler', elsykler og små elektriske kjøretøy[11]. Det er tekniske krav som gjelder vanlige sykler gjelder også elsykler som skal brukes i Norge. For elsykler kommer det ekstra krav i tillegg til disse.

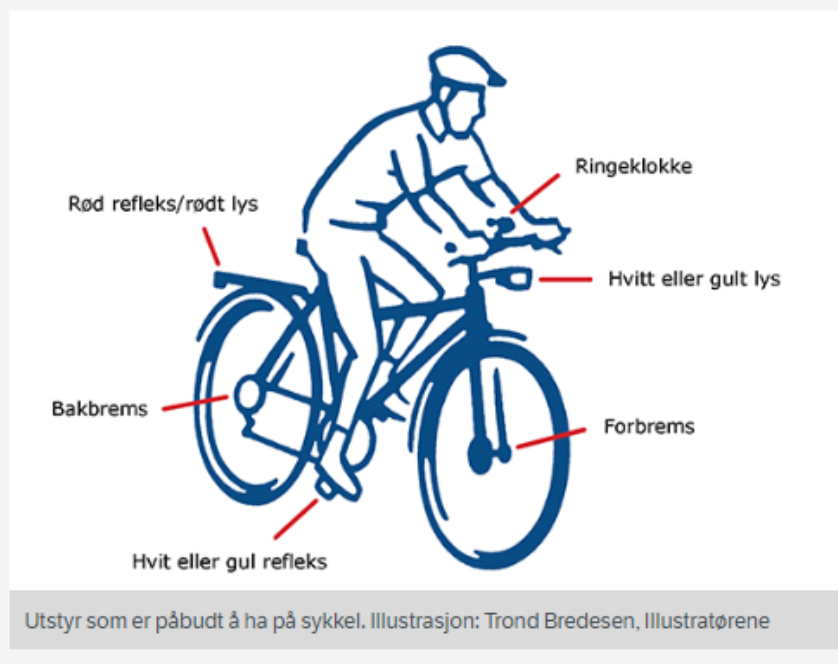
For elsykler er det begrensninger for effekten til den elektriske motoren og krav til hvordan motoren styres. Motoreffekten skal ikke overstige 250W for de fleste elsykler, men det finnes to unntak. Elsykler med to eller flere sitteplasser kan ha effekt på 500W hvis de er utdelt/utlånt fra arbeids- og velferdsetaten. Elsykler som har tre eller flere sitteplasser og tre hjul kan ifølge et vedtak fra Vegdirektoratet ha effekt på 500W. Motoren kan kjøre alene uten at pedalene blir brukt opp til 6 km/t som 'startsassistanse', etter at 6 km/t er oppnådd skal motoren kun kjøre hvis pedalene er i bruk. Motoren skal slutte å hjelpe når sykkelen har kommet opp i 25 km/t[12]. Sykler som stanser motoren når bremsene blir brukt (bremsesensor) kan trille uten at syklisten trækker fem meter før motoren kutter, sykler uten bremsesensor kan bare trille to meter [13].

Bremser, ringeklokke, lys og refleks er påbudt utstyr.

Krav til sykkel:

- Minst to separate bremser som virker uavhengig av hverandre, den ene på framhjulet og den andre på bakhjulet. Sykkelen skal kunne stanse på en sikker, hurtig og effektiv måte.
- Det skal være rød refleks bak – «kattøye». På begge sidene av pedalene, eventuelt på pedalarmene dersom det er klikkpedaler, skal det være hvit eller gul refleks. Refleksen skal være av godkjent type, det vil si merket med CE eller E.
- Ved sykling i mørke eller skumring på vanlig vei eller område skal sykkel ha lykt med gult eller hvitt lys og/eller flerfunksjonslykt som kan gi blinkende eller fast hvitt lys foran. Bak skal sykkel ha lykt med rødt eller rødt blinkende lys. Dette gjelder også ved sykling på fortau og på gang- eller sykkelvei.
- Lykten foran skal gi tilstrekkelig lys uten å virke blendende.
- Lykten bak skal kunne sees tydelig i en avstand på 300 meter. Lykt som gir blinkende lys skal blinke med minst 120 blink per minutt.
- Lyktene skal være festet på sykkel.
- Ringeklokke
- For elsykkel gjelder det også krav til motorens effekt og virkemåte.

Du kan også ha god bruk for speil på sykkel i trafikken. Speil kan blant annet hjelpe deg til å unngå farlige situasjoner i forhold til trafikken bak.



Figur 7: Regelverk for sykler fra statens vegvesen [14]

2.2.2 Elektriske motorer

Elektriske motorer består av en stator og en rotor. For børsteløse likestrøms motorer (BLDC - BrushLess Direct Current) som vanligvis brukes på elektriske sykler har rotoren permanentmagneter med forskjellige ladninger (positiv eller negativ) og statoren viklinger som fungerer som elektriske magneter. Når strøm går igjennom viklingen vil det skapes et magnetfelt rundt viklingen som enten tiltrekker eller frastører permanentmagnetene i henhold til ladningen i magnetene og viklingene. BLDC bruker elektronikk til å styre strømretningen igjennom viklingene som igjen styrer omdreiningshastigheten ved å styre hvor fort viklingene endrer ladning.

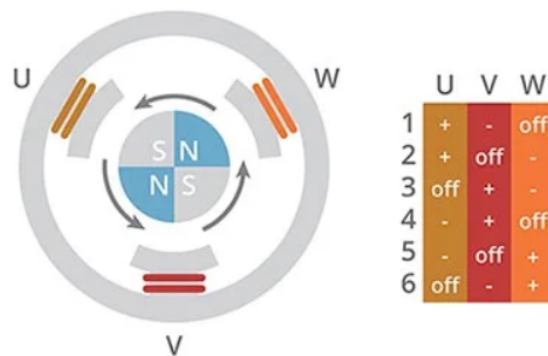


Figure 1: Six-step pattern for BLDC motor commutation.

Figur 8: Illustrasjon av en enkel BLDC motor med en rototr med permanentmagneter i senter og en stator med viklinger rundt. Skjematikken til høyre viser hvordan ladningene i viklingene bytter fra pluss til minus til av for å lage et roterende magnetfelt som drar rotoren rundt [15].

Effekten til motoren er gitt av Ohms lov, og er avhengig av batterispennning, maksverdi for utladning fra batteriet (maksimum strømstyrke) og motorens indre motstand. Maksimal batterispennning er satt til 48V[13]. Det er hovedsakelig tilgjengelig spenning og strømstyrke fra batteriet som begrenser hvor mye effekt som er mulig å generere. Det er også viktig at motoren er dimensjonert for strømstyrken gjennom viklingene og elektronikken.

Ohms lov:

$$P = U \times I \text{ og } U = R \times I$$

Hvor P er effekt i Watt (W), I er strøm i Ampere (A) og R er motstand i Ohm (Ω).

Motorer til elsykler kan deles inn i de to hovedgruppene navmotor og krankmotor.

Navmotorer er plassert i navet til hjulet og driver dette direkte med eller uten annen hjelp, mens krankmotorer er plassert imellom pedalene og øker kraften ifra krank til hjul. Motorer kommer igjen i to forskjellige hovedgrupperinger, direkte drevet motor eller giret motor. I direkte drevet navmotorer er rotoren til motoren festet direkte til hjulet, men girede motorer har indre gir som senker farten og øker momentet mellom motor og hjul. En giret motor vil derfor som regel kunne gi større moment, men vil også være utsatt for mer slitasje på grunn av flere bevegelige deler. For tung last vil derfor en direkte drevet navmotor med større viklinger kunne gi best resultat med tanke på moment og driftsikkerhet[16].



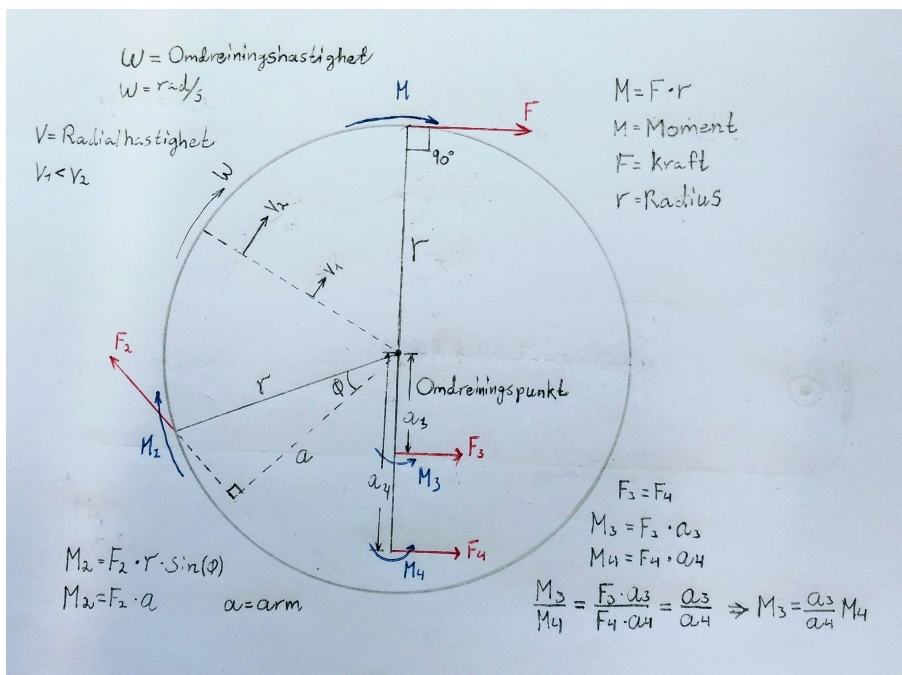
Figur 9: Fra venstre: krankmotor, navmotor i fronthjul og navmotor i bakhjul [17]

Motoren kan styres av enten en rotasjonssensor eller en momentsensor. Den enkleste teknologien er rotasjonssensorer som reager på at pedalene er satt i bevegelse. Rotasjonssensorer bryr seg kun om pedalene er i bevegelse, og ikke hvor hardt syklisten trækker, som betyr at motoren kan ta seg av nesten all framdriften med veldig lite pådrag fra syklisten. En negativ ting med rotasjonssensor er at den reagerer litt tregt siden sykkelen må være i bevegelse før motoren starter. Dette kan løses med startassistanse [13].

Momentsensorer på pedalene vil oppdage at syklisten trækker øyeblikket foten presser ned på pedalen. Dette gjør at motoren begynner å hjelpe til selv før sykkelen er satt i bevegelse. Momentsensorer leser hvor hardt syklisten trækker og motoren vil gi en effekt som er proporsjonal med kraften i syklistens trakk. Dette gir en mer naturlig følelse og kan spare en del batteri da det kreves at syklisten også gir et visst pådrag. Den negative siden med momentsensorer er at syklisten normalt blir mer sliten som følge av at han eller hun må trække hardere for å få maksimal kraft fra motoren. Men hvor hardt det må trækkes kan stilles inn for en enkelt sykkel slik at nødvendig moment fra syklist blir veldig liten. Momentsensorer er også dyrere enn rotasjonssensorer [13].

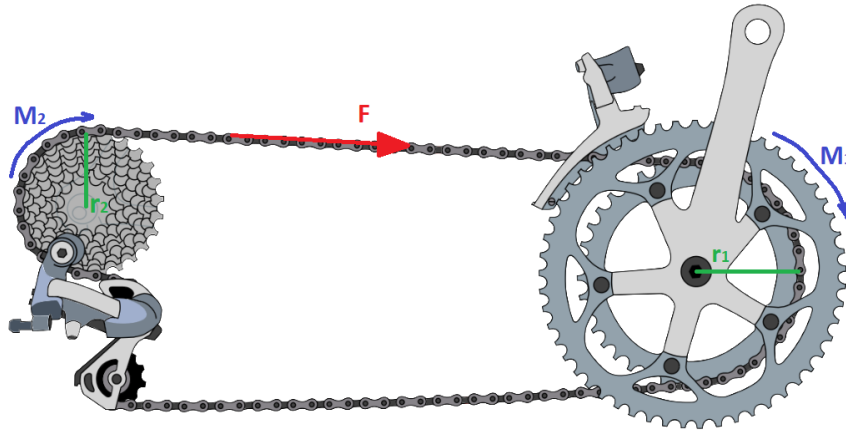
2.2.3 Moment og gir

Moment er enkelt forklart kraft ganger arm. Så hvis kraften ikke kan økes kan momentet økse med lenger arm. Armen er lengden fra rotasjonsaksen til der armen vil treffe vinkelrett på retningen til kraften. Lenger arm gir lavere radialhastighet som betyr at moment økes på bekostning av fart.



Figur 10: Ligninger for moment på en plate som roterer om en aksling i senter

For å øke momentet fra pedalene/motoren må det være en økning av armen fra motoren til hjulet. Dette kan enkelt sees med vanlige sykkelgir av typen derailleurs/avhoppsgir der det brukes tannhjul i forskjellige størrelser. Er det et mindre tannhjul forran enn bak så har armen økt, momentet har økt og rotasjonshastigheten har sunket. Ved bruk av gir kan enten momentet eller rotasjonshastigheten økes på bekostning av den andre.



Figur 11: Avhoppsgir med moment (blått), radius (grønt) og kraft (rødt). Momentet fra syklist som trækker er M_1 , kraften F er M_1 ganger r_1 som blir overført via kjede til giret bak og momentet på bakhjulet M_2 tilsvarer F ganger r_2 [18]

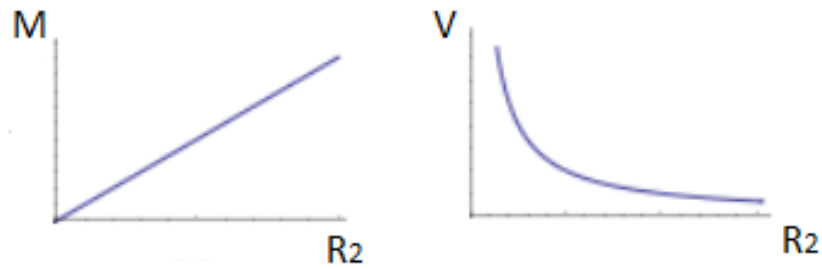
Moment:

$$F = M_1/r_1 = M_2/r_2 \Rightarrow M_2 = M_1 \times (r_2/r_1) \quad (1)$$

Omdreiningshastighet:

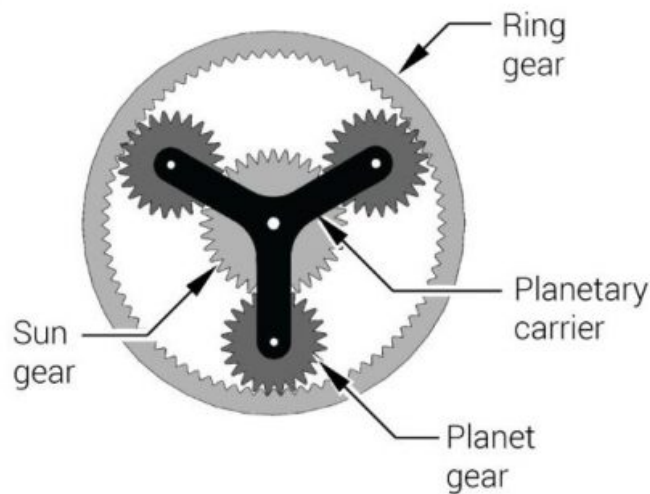
$$V = w_1 \times r_1 = w_2 \times r_2 \Rightarrow w_2 = w_1 \times (r_1/r_2) \quad (2)$$

Man kan enkelt se hvordan moment og omdreiningshastighet henger sammen ved at forholdet mellom radiusene er snudd fra den ene til den andre. Økes for eksempel r_2 vil momentet økes da telleren økes i momentligningen, og omdreiningshastigheten synke da nevneren økes i omdreiningshastighetligningen.



Figur 12: Endring av moment (venstre) og fart (høyre) ved konstant r_1 og økende r_2 .

En type gir som blir brukt i blant annet automatiske girkasser i biler er planetgir som har en litt spesiell oppbygning. Planetgir består av som regel av ett solhjul, tre eller flere planethjul som er koblet sammen på en planethjulholder og ett ringhjul. Solhjulet er innerst med planethjulene fordelt utpå og ytterst er ringhjulet[19].



Figur 13: Enkel skisse av et planetgir [20]

Forskjellige utvekslinger kan oppnås ved å ha input eller output på solhjulet, planethjulholderen eller ringhjulet mens den delen som ikke er input eller output blir holdt fast. Brukes solhjulet som input og planetholderen som output, og ringhjulet holdes fast, blir utvekslingen:

$$M_2 = M_1(1 + (r_r/r_s)) \quad (3)$$

Hvor r_r er ringhjulets radius og r_s er solhjulets radius.

3 Metode

Denne delen tar for seg hvordan produktutviklingsprosessen vil bli gjennomført i denne oppgaven. Metodene baserer seg på produktutviklingsteorien i det forgående kapittelet og er videreutviklet for denne spesifikke oppgaven.

3.1 Agile set-based design

I denne oppgaven vil det bli gjort flere iterasjoner av hver fase. Når et hovedkonsept er utviklet i fase 1 vil det gå videre til fase 2 der det blir sett på hvordan konseptet passer sammen med resten av drivverket og sykkelens helhet som et system-nivå konsept[5]. Om det ikke fungerer optimalt og det må gjøres endringer på hovedkonseptet vil det tas tilbake til fase 1 for å forbedre designet. Det samme gjelder overgangen til detalj-nivå konsepter. Om det ikke blir tid til å ta et konsept helt over til detalj-nivå fasen vil det bli tatt en kjapp gjennomgang for å utforske om det finnes konseptløsninger som kan utforskes og utvikles videre i denne fasen. Hvis det viser seg at et hovedkonsept eller et system-nivå konsept ikke oppfyller kundens behov eller vil kreve mer ressurser enn dette prosjektet kan yte vil det bli forkastet[8].

Er det flere konsept som oppfyller kravene bør så mange som mulig bli tatt med videre[8]. Det vil være begrensninger for hvor mange konsept det vil være mulig å se på samtidig i dette prosjektet. Dette prosjektet har ikke et team som kan fordele konsept og arbeidsoppgaver, og det er en rigid tidsramme. Beslutninger skal tas så sent som mulig slik at de kan bli tatt med størst mulig kunnskapsgrunnlag[6]. Men på grunn av tidsrammen og et ønske om minimum ett gjennomtenkt konsept som kan legges fram til kunden vil det ikke være mulig å forsinke beslutninger om hvilke konsept som skal prioriteres lenge. På grunn av begrensede ressurser må det tas prioriteringer om hvilke konsept som er best av de konseptene som oppfyller kundebehovene. Det vil derfor bli gjort sammenligninger for å se hvilke sterke og svake sider hvert konsept har, og hvordan disse passer med prioriteringen av behov[5].

3.2 Fuzzy front-end

Denne oppgaven befinner seg i stor grad i den delen av et utviklingsprosjekt som kalles 'fuzzy front-end'. Det er ingen plan for hvilken retning dette prosjektet skal ta utenom at det skal jobbes med drivverket. Hvilke deler av drivverket det vil bli sett nøyere på (krank, gir, kraftoverføring osv.) er ikke klart. Hva slags type konsept som vil passe prosjektet best (tegning og tekst, 3D-modell, prototyper osv.) er heller ikke klart. Denne fasen har sine egne problemer, arbeidsoppgaver og verktøy.

Hovedproblemet er at utvikleren i grunn starter i blinde når det skal foretas prosjekter med ukjente produkter og kundegrupper. Sjelden har en utvikler full oversikt over alle mangler i kunnskapsgrunnlaget. Det vil ofte være like viktig å finne ut akkurat hvor det mangler informasjon og forståelse som det er å fylle inn de kjente manglene. Utvikleren bør rekognosere fagfeltet, kunder, bruk og mulige løsninger og få en god oversikt over hvilke veier (konsepter) som er blindveier med tanke på å lage et godt produkt. Dette vil kreve en del prøving og feiling[21]. For dette prosjektet vil dette bety at det må sees på hver del av designet av drivverket for å finne ut hvor det er problemer som må løses og hvor det er mulighet for forbedringer. Nye innovative konsepter vil i seg selv være et ukjent territorium som må undersøkes for å finne ut hvilke designbeslutninger som vil lede til et optimalt konsept. Denne prosessen kan gjøres iterativ da det kan møtes på blindeveier som stopper videre utvikling i en retning, men prosjektet må fortsette[21].

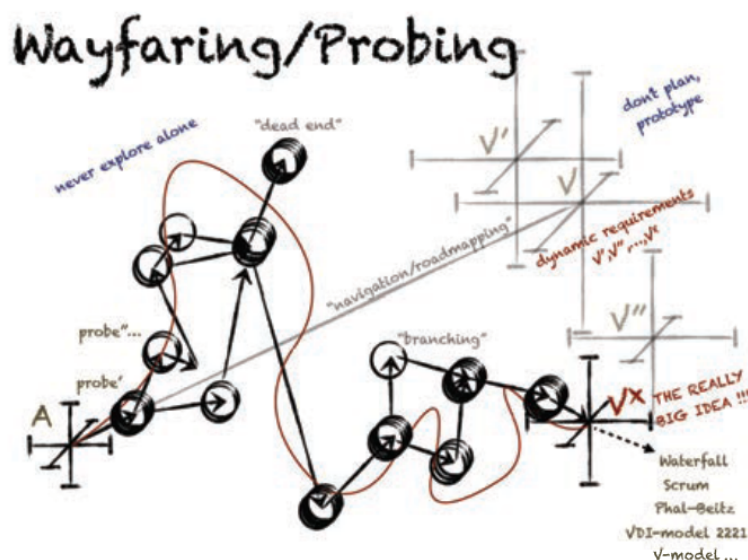


Fig. 1. The Wayfaring Process (From [14]).

Figur 14: Illustrasjon på hvordan rekognosering kan fungere i et prosjekt [21]

Det viktigste med denne tidlige fasen er å bygge et godt kunnskapsgrunnlag. Utvikler har i dette tilfellet ingen god innsikt i produktet eller bruken før prosjektets start. Skal det utvikles konsept er det veldig viktig at kunnskapsgrunnlaget er godt, slik at det ikke brukes unødvendig mye tid på konsept som ikke vil fungere og de konseptene som fungerer skal fungere optimalt. Det må foretas grundige undersøkelser av både kundebehov, tilgjengelig teknologi og eksisterende løsninger[5]. Oppgaven vil derfor ta for seg en grundig problemundersøkelse av utfordringer, og se på eksisterende teknologi for å finne ut hvor det finnes og hvor det mangler tilfredsstillende løsninger i markedet.

For å forstå kundens behov er det viktig å kunne sette seg inn i deres stilling og i mest mulig grad utsette seg for deres problemer på likest mulig grunnlag. Dette er også viktig for å forstå hvordan konsepter vil bli brukt av kunden. Konsepter må testes i de omstendigheter produktet vil møte etter overlevering til kunden. Tester under falske omstendigheter kan gi feil svar og lede prosjektet langt ned en blindvei før det oppdages at konseptet ikke fungerer som det egentlig skal. I denne oppgaven vil det tilsvare å observere transportavdelingen på jobb, å finne ut hvilke nye veier de vil bruke med en sykkel istedet for bil og å kjøre disse rutene selv med en sykkel.

3.3 Kundebehov

Dette produktet skal utvikles for en kunde med egne spesifikke behov. Det vil ikke blir fokusert på et stort marked. Kunden og brukerne er konsentrert på transportavdelingen. Siden dette produktet blir laget for å kun brukes av transportavdelingen på NTNU vil det være dem som har mest å si for de endelige valgene, men det kan være veldig nyttig å snakke med andre brukere av varesykler for mer feedback på mulige forberedelser.

Det vil hovedsakelig være intervjuer som vil bli brukt til å samle behov og informasjon. Mulig bruk av sykkelen (pålasting, reisevei og levering) blir gjort ved en gjennomgang av transportavdelingen. Avdelingens rutiner for mottak, lagring og levering blir gjort ved observasjoner av avdelingen i arbeid. For god oversikt over veier, hindringer og andre aspekter ved leveranser vil det bli gjennomført prøverunder med en vanlig sykkel der transportavdelingen høyst sannsynlig vil bruke varesykkelen.

For å ha oversikt over avdekkede behov vil de bli delt inn i første-, andre- og tredjegrads prioriteringer. Konseptene må oppfylle førstegrads behovene, mens andre-

grads, og muligens tredjegrads, behovene vil brukes til sammenligning av konsepter[5]. Om et konsept oppfyller førstegrads behovene vil det være nok for at det ikke forkastes. Men på grunn av manglende ressurser må det være noen andregrads og muligens tredjegrads behov for å skille ut hvilke konsept som skal utvikles videre mellom fasene[8].

3.3.1 Intervju

For å samle kundebehov og informasjon om problemer som må løses vil det bli gjennomført intervjuer. I første omgang vil det være viktig å ha få til en åpen dialog slik at alle de involverte føler at de kan komme med innspill. Når utviklingen går videre vil det være viktig at intervjuer og andre samtaler med transportavdelingen og andre samarbeidspartnere blir fokusert inn på mulige løsninger og tilbakemeldinger på disse. Intervjuene vil bli foretatt i store grupper og med enkelte personer på enmannshånd. Enkle spørsmål som trenger klare svar vil bli spurt vi e-post, men det vil prioriteres å ha møter med personene for å lettere kunne spørre oppfølgningsspørsmål og for å få mer utfyllende svar.

3.4 Konseptutvikling

Denne oppgaven skrives som et soloprosjekt så den vil skille seg fra de fleste andre utviklingsprosjekter som gjennomføres i team. Dette vil fjerne en del problemstillinger med tanke på samarbeid, men det vil også føre til et tap av effektivitet og kvalitetssikring som følge av at det ikke er noen fallsikring i andre personers meninger og innvendinger. 'Brainstorming' vil i mest mulig grad foretas som normalt med et åpent sinn til egne innskytelser som skrives ned og prosesseres etter tur.

For å avklare problemer og delproblemer må det være en oversikt over hvilke utfordringen en sykkel møter med tanke på bakker, føre og andre hindringer. Behovet når det gjelder kraft, moment og utvekslinger kan i stor grad anslås ved å sette opp matematiske modeller av situasjoner. For eksempel hvordan tung last påvirker en sykkel i en bakke og hvordan dette påvirker momentkravet på hjulene kan illustreres som ren fysikk/mekanikk og simplifiseres i ligninger. For å kunne regne ut krav til kraft og moment må kundens ønsker og behov være etablert da det er umulig å estimere momentbehov uten å vite lastbehov og ønsket design av sykkelen. Det vil være mulig å forenkle denne prosessen ved å finne ut hvor kundens ønsker med tanke på plassering av last, antall hjul og motortype. Men for å holde flest mulig

veiere åpne vil det bli gjort en grundig jobb med å se på flere forskjellige løsninger. Dette gjøres for å ikke forkaste noen muligheter som kan vise seg å faktisk være i kundens interesse selv om kunden selv ikke er klar over det.

Når det er klart hvilke fysiske problemer som må løses vil det bli gjort et søk for å finne løsninger på markedet. Det vil sees på komplette drivverk og komponenter. Om det viser seg at det ikke finnes en løsning på markedet som oppfyller behovene må det utvikles nye løsninger.

Konseptene vil først og fremst være beskrivelser i form av tekst og bilder. Fysiske prototyper vil bare lages når det er usikkerhet rundt funksjonaliteten av konsepter. Hvis et konsept bruker kjente komponenter og virkemåter vil teorien være bevis nok. Det er viktig å høre fokus på hva som er verdiskapende aktiviteter og hva som virker fremgang men egentlig er bortkastet. Det er ingen grunn til å lage en fysisk prototype for å bevise noe ingen betviler. Det er viktig å huske på at tegninger og beskrivelser også regnes som prototyper[5].

3.5 Valg av konsept

Valg av konsepter vil bli tatt med hensyn på oppfyllelse av kundens behov, hvor lett det er å lage deler med utstyret til NTNU og om konseptet bygger på kjente komponenter. Eلسykler og utstyr til elsykler koster mye. Det kan bli foretatt utprøvende kjøreturer ved å låne sykler fra en leverandør, men det vil ikke være innenfor prosjektets rammer å gå til innkjøp av en elsykkel eller utstyr for å omgjøre en vanlig sykkel til elsykkel om det ikke er helt nødvendig. Dette vil koste både tid og penger for eksperimentell informasjons innhenting som kan vise seg å være en blindvei i prosjektet[22]. For valg av konsept som skal tas videre til neste fase vil det derfor ligge til grunn at det vil være mulig å teste konseptet innenfor tidsrammen og budsjettet til denne oppgaven. Om et konsept er lovende men det kommer til å ta for lang tid eller mye penger å innhente den informasjonen som er nødvendig for å ta konseptet videre vil dette konseptet bli satt til side for konsepter som kan utvikles videre innenfor prosjektets rammer.

Valg vil hovedsakelig bli tatt internt i samarbeid med veileder. Eksterne som transportavdelingen og andre som jobber med leveranser vil ikke være klar over NTNU sine muligheter til å realisere konseptet. Bruk av matriser vil kun bli tatt i bruk hvis det er mange konsepter og stor tvil om rangering[5].

4 Problemundersøkelse og konseptutvikling

Dette kapittelet vil fokusere på kundebehov, eksisterende løsninger, fysiske utfordringer ved bruk av sykkel til leveranser og mulige konsept som løser disse utfordringene. For å kunne utvikle gode konsepter må det bygges et godt kunnskapsgrunnlag med kundebehov, eksisterende løsninger og fysiske utfordringer. Konseptene kan være eksisterende løsninger på markedet som møter kundebehovene, eller nye innovative løsninger som vil fungere bedre enn eksisterende løsninger. Utfordringer vil bli gjennomgått etter tur, og de blir til slutt samlet som en fremgangsmåte for konseptvalg. Fremgangsmåten skal kunne brukes for alle som ønsker å designe en elsykkel. Forhåpentligvis vil dette gjøre det enklere om det skal dukke opp endringer i designet som kan påvirke utfallet av konseptvalg, og den skal kunne brukes for alle typer sykler. Det vil vurderes forskjellige konsept i en deldiskusjon, og utifra denne vil det konkluderes med hvilke konsepter som skal tas med videre i denne oppgaven.

4.1 Behov

Kundens behov er samlet ved intervjuer av personer som jobber på transportavdelingen. Det ble foretatt intervjuer med avdelingsledere som har ansvar for administrasjon og arbeiderne som utfører selve leveringen. Fra samtaler med de med ansvar for administrasjonen av leveringene kom det fram at det er vanskelig å sette noen krav når det kommer til hvor mye lagringsplass sykkelen skal ha og hvor tung last sykkelen skal kunne frakte. Det er umulig å forutsi hva instituttene på NTNU kommer til å bestille i fremtiden. På Gløshaugen campus finnes det flere studieretninger, blant annet maskiningeniører, byggingeniører, elektroingeniører og arkitekter, som trenger materialer og utstyr til prosjekter, verksteder og laboratorier[23]. Transportavdelingen ønsker å kunne levere mest mulig selv, men når det kommer til store kolli og uhandterlige pakker bruker de en ekstern samarbeidspartner. Bilene som brukes den dag i dag er nye elektriske varebiler av typen Nissan e-NV200 som fortsatt vil være tilgjengelige som alternativ til en eventuell varesykkel i mange år fremover. De på transportavdelingen mener selv at en kasse på størrelse med et gitterbur som de bruker til lagring og flytting av pakker på sentralen vil være tilstrekkelig de aller fleste dager. Men selv med et begrenset lagringsrom vil det være vanskelig å si hvor tung lasten vil bli.



Figur 15: Bur som blir brukt på sentralen. Dimensjoner: 74x150x113 cm

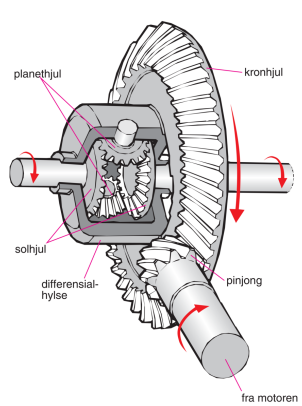
De som skal bruke sykkelen ønsker seg en sykkel som er brukervennlig og sikker med tanke på syklist, fotgjengere og andre trafikanter. Sikkerhet var det som ble kollektivt rangert høyest av prioriteringer både blant de som skulle utføre arbeidet og de som overså arbeidet. Med tanke på hvor mange myke trafikanter som går rundt på campus er det veldig viktig at sykkelen er pålitelig, lett å styre og har kort bremselengde. Brukerne har god erfaring med ABS og ønsker en lignende løsning for varecykkelen.

Sykkelen må kunne komme seg fram i all slags vær, opp bratte bakker og over røft terreng. Sjøførene ønsker ikke å måtte bruke unødvendig mye krefter i jobben sin så designet bør være slik at motoren kan ta mesteparten av ytelsen. Dette betyr at motoren og drivverket bør kunne generere nok moment for å takle alle sykkelens bruksområder uten at syklisten må bruke mye krefter. De fleste som jobber på transportavdelingen er sunne mennesker i god form, men det bør ikke være et krav for å kunne bruke sykkelen. Det kan godt være at sykkelen vil bli brukt av mennesker med nedsatt funksjon når det kommer til kondisjon, bevegelighet og

styrke. Det vil derfor være viktig at sykkelen er så lett å bruke som mulig. Det er et ønske om at motoren skal kunne ta seg av nesten all fremdriften på turer der syklisten har nedsatt yteevne.

For størst mulig kraft til fremdrift vil det være optimalt med en differensial om det skal være to hjul bak. Om det er to hjul bak vil en differensial fordele kraften fra motor og syklist til begge bakhjulene, og det vil være mulig å ta skarpe svinger. En differensial vil trolig være nødvendig om det skal være drift på begge bakhjulene fra kranken da det vil være nærmest umulig å svinge om bakhjulene er koblet sammen med en fast aksling.

Det er ikke ønsket fra sjåførene eller de som administrerer at sykkel skal kunne gå veldig fort med tanke på sikkerhet og tilgjengelig tid til leveranser, men den må kunne brukes i en hastighet som gjør sykkelen til en konkurrent for bilene som blir brukt på strekningen mellom postsentralen og campus. På grunn av fartsgrenser og bilveiens rute sammenlignet med sykkelveiens rute vil en vanlig sykkel kunne kjøre strekningen raskere, spesielt hvis trafikk på bilveien blir tatt med i betraktningen. Sykkelen vil fortsatt være brukbar selv om den bruker litt lenger tid til campus enn det en bil vil bruke. Å bruke en sykkel inne på campus vil trolig spare tid da den kan kjøre på flere veier enn bilen, parkere flere steder og er raskere å hoppe av og på.



Figur 16: Oppbyggingen av en differensial ([24]). For en sykkel kan kjede eller reim benyttes for å drive kronhjulet.



Figur 17: Eksempel av differensial på en trehjulssykkel hvor kjedet blir brukt til å drive kronhjulet ([25]).

Brukerne mente at sykkelen burde ha minst tre hjul med tanke på syklisten sin sikkerhet mot velting, og med tanke på hvor ofte sykkelen må stoppe i trafikken og

hvor mange forskjellige leveringsteder det er på campus hvor syklisten bør kunne hoppe raskt av og på sykkelen uten å være redd for at den skal velte. For rask av- og påstigning vil et vanlig sykkelsete være bedre enn et lavt sete med pedalene forran føreren. De mente at lasten burde plasseres bak føreren da det kan være store pakker som skal fraktes og disse kan ikke komme i veien for førerens sikt. Dette betyr at det vil være to hjul bak. Det var også ønsker om mest mulig komfort som dekning mot været og varme i håndtakene. Sikkerhet og fremkommelighet vil være de viktigste faktorene, med komfort som en sekunder prioritering.

Intervjuobjektene ble vist forskjellige typer sykler og det var stor enighet om at en modell fra EVO Elsykler som heter Radkutsche Musketier var det designet som appellerte mest og tilfredsstilte mesteparten av kundens ønsker og behov.



Figur 18: Bilde av en Radkutsche Musketier sykkel med en ekstra tilhenger tilkoblet. Dette designet ble valgt ut av transportavdelingen fra en samling av eksempler på forskjellige designløsninger for vare sykler.

4.1.1 Oppsummert kundebehov

Det kom fram flere behov og ønsker fra kunden som vil ha en påvirkning på drivverket:

Sykkelen skal komme seg lett opp bakker.

Sykkelen trenger ikke å være veldig rask, men den må kunne oppnå en relativt grei hastighet.

Nødvendig hjelp fra syklist for moment og fart bør være minimal.

Sykkelen skal kunne brukes av personer med nedsatt yteevne.

Sykkelen skal komme seg fram selv i snø, gjørme og på is.

Maksimal lastvekt bør være størst mulig, og eventuelt begrenses av bremseeffekt istedet for drivkraft.

Sykkelen bør være enkel å bruke.

Disse kan skrives om for å spesifisere hvilke parametre som må undersøkes. Behovene er delt inn i første-, andre- og tredjegrads prioriteringer.

Behov		
Førstegrads pri.	Andregrads pri.	Tredjegrads pri.
Sikkerhet	Kun motorkraft	Ukomplisert bruk
Høyt moment	Kan brukes av alle	
Relativt høy fart		
Veigrep		

Når det skal sees på drivverket er det tydelig at sikkerhet og fremkommelighet blir det viktigste. Sykkelen skal hovedsakelig brukes av friske, sunne mennesker og om det er noen på transportavdelingen som av en eller annen grunn ikke kan bruke sykkelen som normalt kan de benytte seg av en bil. Sykkelen skal brukes av sykklistere som vil få god tid til å sette seg inn i sykkelens bruk så et litt komplisert system vil være overkommelig.

4.2 Problemundersøkelse

Dette delkapittelet handler om de fysiske utfordringene som tilsvarer kundebehovene om fremkommelighet.

4.2.1 Friksjon og fremdrift

For å drive sykkelen fremover må hjulet ha god bakkekontakt, ellers vil hjulet spinne oppå underlaget og sykkelen vil bli stående. Når en sykkel ruller bortover som følge av at et hjul roterer er det friksjonen mellom bakke og hjul som dytter sykkelen fremover. Friksjonskraften må overvinne alle de andre kreftene som motvirker sykkelens bevegelse som vindmotstand, bevegelsestregghet og vekt som drar sykkelen bakover i oppoverbakker.

Friksjonen mellom dekk og bakken er gitt av friksjonskoeffisienten og hvor stor normalkraften mellom dekket og bakken er. Friksjonskoeffisienten er hvor godt dekkets materiale sitter mot underlagets materiale. Normalkraften mellom et hjul og bak-

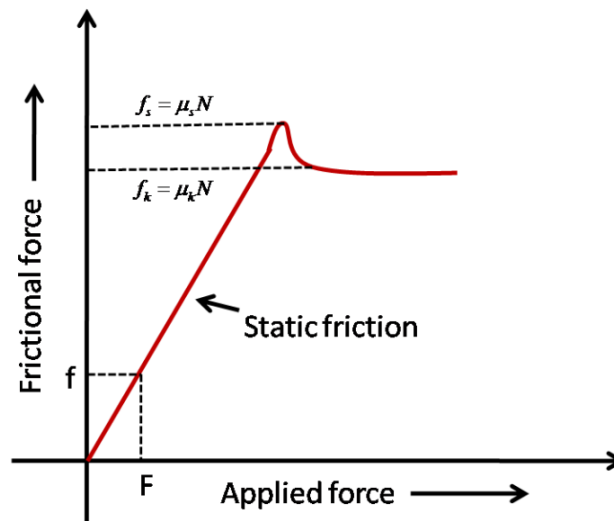
ken øker med hvor mye sykkelen veier og reduseres desto flere hjul sykkelen har da vekten blir fordelt på flere punkter. Med to bakhjul og et lasteplan over akslingen vil lasten være fordelt likt over begge hjulene om lasten er fordelt likt i lasterommet, som betyr at normalkraften og dermed friksjonskraften blir halvert for hvert hjul. Om det bare er drift på det ene hjulet må den halverte friksjonskraften være større enn alle motkreftene. Ved å ha framdrift på begge bakhjulene blir tilgjengelig friksjonskraft som kan overvinne motkreftene doblet.

Friksjonskraft:

$$F = \mu * N = \mu * (m * g) \quad (4)$$

Hvor μ er friksjonskoeffisienten, N er normalkraften (viktig å ikke blande normalkraften og Newton som begge kan betegnes med N), m er vekten av sykkelen og all vekt på sykkelen i kilogram og g er gravitasjonsakselerasjonen gitt i m/s^2 .

Statisk friksjonskraft er friksjon mellom to overflater som ikke beveger seg i forhold tilhverandre. Når et hjul ruller fremover er det en type statisk friksjon da hjulet ikke glir men heller har forskjellige punkter på dekket som dytter ifra og blir løftet opp mens neste punkt treffer bakken. Når to overflater glir mot hverandre oppstår glidefriksjon, som når hjulet spinner på glatt underlag. Den statiske friksjonkraften er større enn glidefriksjonen. Dette betyr at om hjulet begynner å spinne er det best å stanse det for så å prøve på nytt med statisk friksjon.



Figur 19: Hvordan friksjonskraften endres når ytre krefter overviner den statiske friksjonen[26].

Gyldendals formelsamling oppgir normale friksjonskoeffisienter for gummi mot fast dekke og is:

Gummi mot fast dekke (tørt) = 0,4 - 1,0

Gummi mot fast dekke (vått) = 0,05 - 0,9

Gummi mot is = 0,02

For flater som ikke er klebrige vil ikke arealet av kontaktflaten ha noe å si på friksjonskraften da normalkraften blir fordelt over arealet hvor alle punkter bidrar til friksjonskraften. Om en kraft på 2 Newton virker på et areal som økes fra 1 kvadratcentimeter til 2 vil normalkraften bli fordelt og hver kvadratcentimeter vil ha halvparten av den originale friksjonskraften, men tilsammen vil de to kvadratcentimeterene tilsvare den originale friksjonskraften. Men hvis materialet til hjulet eller underlaget er klebrig vil friksjonen øke med økt areal. Mange kjenner til at om en bil sliter på glatt føre er det mulig å slippe ut luft fra dekket for å få bedre grep. Dette er ikke alltid positivt da den bakre delene av hjulet som er i kontakt med bakken faktisk må løsne under rulling, som vil bli vanskeligere desto mer av det klebrige materialet som må løsnes. Så det vil bli mindre sannsynlig at hjulet spinner, men det vil også kreves større kraft for å få hjulet til å rulle i det hele tatt[27].

For vått underlag vil sykkelhjulets spor ha mye å si for veigrepet. Helt glatte dekk får lettere vannplaning, der hjulet begynner å flyte på vannlaget på bakken. Hjul med spor kan 'kutte' gjennom vannlaget og få kontakt med bakken. På snø vil brede dekk med dype spor få tak i mest mulig snø, som gjør at dekket kan 'grave' seg fremover. På is vil det ofte være nødvendig med pigger av metall for å få feste. Men pigger av metall vil ha dårligere grep på asfalt enn gummi. Det vil være best å ha forskjellige dekk for forskjellig føre.

Det er vanskelig å vite akkurat hvor stor friksjonen mellom hjul og underlag vil være under kjøring. Det er flere parametere utenfor utvikler sin kontroll som endrer friksjonskoeffisienten som forskjellige underlag (for eksempel asfalt, grus og jord) og varmt, kaldt og fuktig vær. Det som kan tas høyde for under designet er hvor vekt blir plassert på sykkelen. Vekt som blir plassert over hjul som skal rulle fritt uten noe pådrag vil kun øke sykkelens motstand mot bevegelse som følge av økt friksjon i lagre og mer vekt å løfte i bakker og over hindringer. Vekt over hjul med drift vil derimot øke den tilgjengelige friksjonskraften som kan drive sykkelen fremover. Blir vekt fordelt over to hjul vil den tilgjengelige friksjonen for fremdrift bli størst hvis det er drift på begge hjulene. Dette vil være en viktig faktor for sykler med et

lasteplan som er plassert over en aksling mellom to hjul.

Kraften som sykkelen dytter ifra med regnes utifra momentet rundt hjulets aksling og hjulets radius:

$$F = \frac{M_{motor} + M_{syklist}}{r_{sykkelhjul}} \quad (5)$$

Denne kraften kan ikke bli større enn den tilgjengelige statiske friksjonskraften mellom hjulet og underlaget da hjulet vil begynne å skli. Det er viktig å tenke på at rask akselerasjon vil øke kraften som virker fra hjulet på bakken. Det vil derfor være større sannsynlighet for at hjulet begynner å spinne hvis sykkelen skal ha stor akselerasjon, spesielt med tung last.

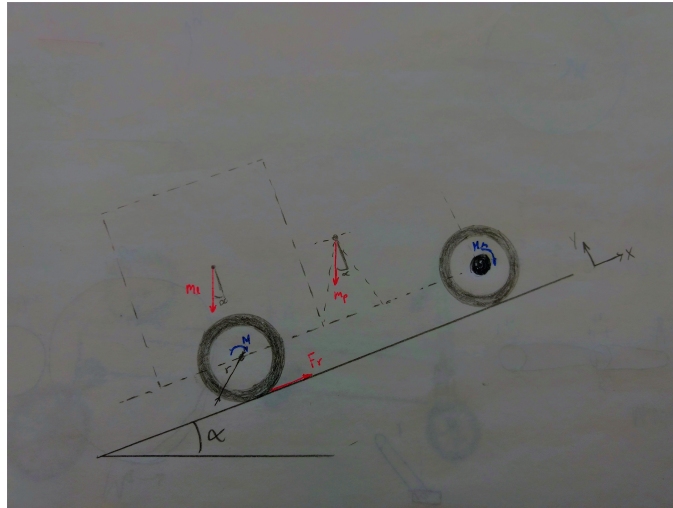
Newtons 2. lov:

$$F = m * a \quad (6)$$

Hvor F er summen av krefter (N) som virker i samme retning, m er massen (kg) som skal flyttes og a er akselerasjonen ($\frac{m}{s^2}$).

4.2.2 Helning og hindringer

På flat mark vil kun bevegelsestreggheten, luftmotstand og indre friksjonskrefter (friksjon i lagre og koblinger) hindre sykkelen i å bevege seg fremover og utenom mulighet for sterk vind vil det vil ikke være noen krefter som vil bevege sykkelen baklengs. I bakker derimot vil sykkelens vekt (inkludert egenvekt, syklist og last) dra sykkelen bakover.

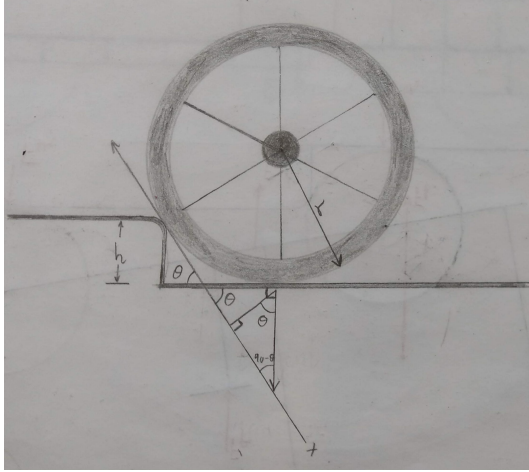


Figur 20: Tegning for å vise krefter og moment for en sykkel i en bakke. Momentet på forhjulet vil kun være med med en motor i fronthjulet. F_r er friksjonskraften fra hjulet som dytter sykkelen fremover.

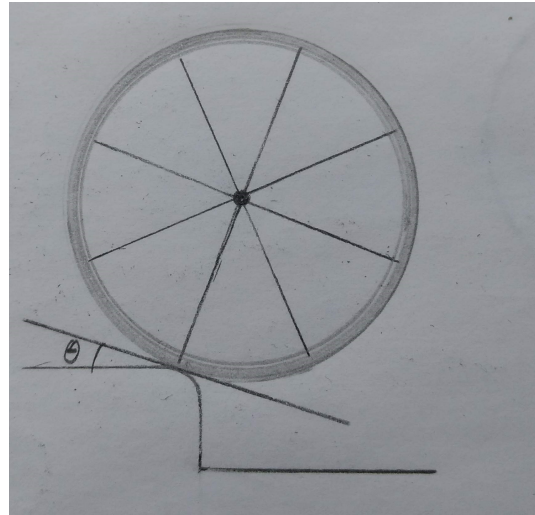
Kraften fra vekten vil peke skrått mot underlaget med en vinkel α og kan deles inn i en del som treffer normalt på bakken og en del som dytter sykkelen bakover. Kraften som dytter sykkelen bakover som drivverket må overvinne blir dermed:

$$F = F_{vekt} * \sin(\alpha) \quad (7)$$

Sykkelens hjul har mye å si for hvor mye kraft sykkelen dytter seg fremover med og hvor fort sykkelen beveger seg fremover. På helt flatt underlag vil det fungere å bruke små hjul for å øke momentet, men små hjul vil slite mer med å komme seg over hindringer.

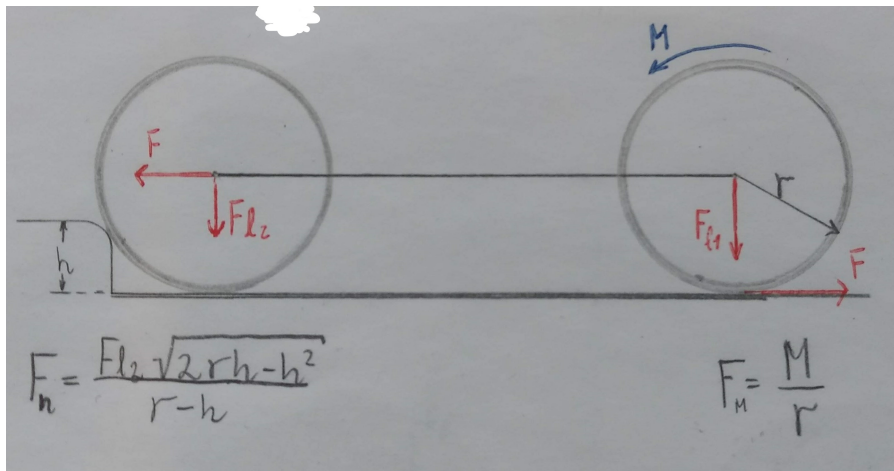


Figur 21: Når et hjul møter en kant vil det tilsvare en veldig bratt bakke. Stigningen vil tilsvare: $\theta = \arccos(1 - (r/h))$



Figur 22: Stigningen θ blir mindre når hjulet beveger seg opp kanten.

Når en sykkel med bakhjulsdrift møter en kant vil først framhjulet bli dyttet over kanten av en horisontal kraft, og så vil bakhjulet kjøre opp kanten med en kraft som virket tangentielt i forhold til punktet der hjulet treffer kanten. Det største momentet som trengs vil være idet hjulet treffer kanten, og det vil minske mens hjulet beveger seg oppover.

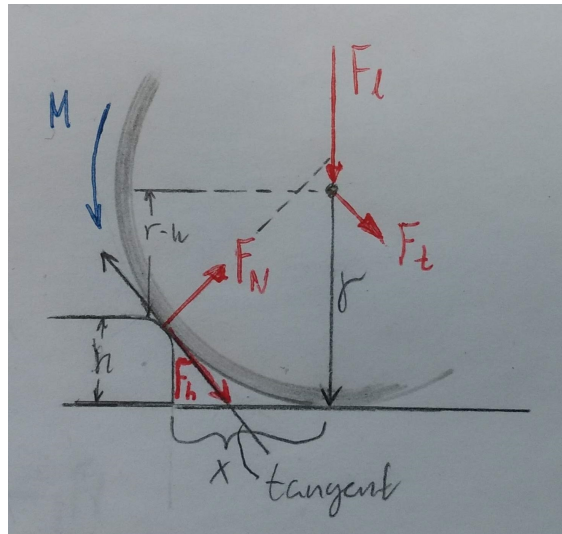


Figur 23: Situasjonen når forhjulet treffer kanten.

Nødvendig kraft for å dytte forhjulet over kanten med kun bakhjulsdrift er gitt av formelen:

$$F_n = \frac{F_{t1} * \sqrt{2rh - h^2}}{r - h} \quad (8)$$

Hvor F_{tf} er tyngden over fronthjulet r er hjulets radius og h er høyden på kanten. F_n blir den nødvendige kraften som må til for å dytte hjulet opp kanten.



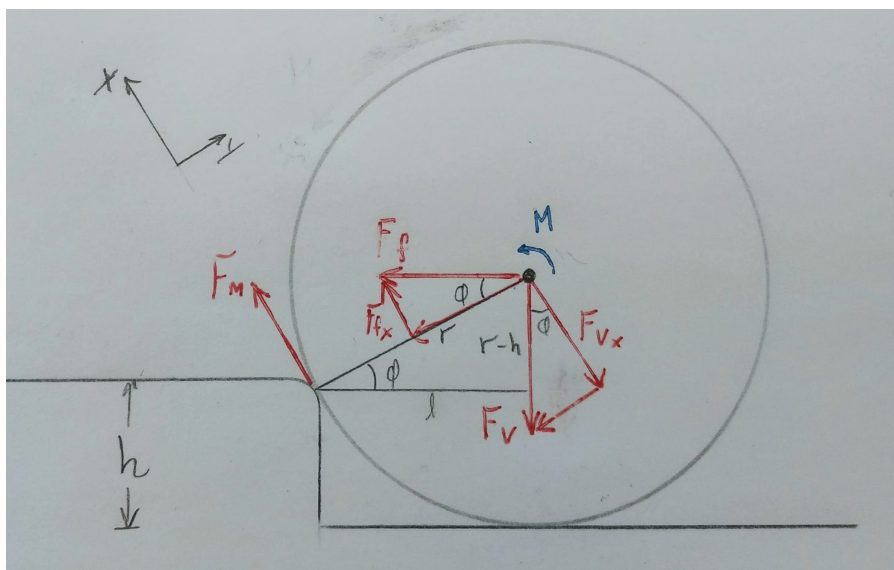
Figur 24: Situasjonen når bakhjulet treffer kanten. F_N tilsvare $F_l * \cos(\theta)$ og $F_t = F_b = F_l * \sin(\theta)$ hvor θ er vinkelen mellom tangenten og horisontalen.

Nødvendig kraft for å få bakhjulet opp kanten er gitt av formelen:

$$F_n = F_{tb} * \sin(\theta) = F_{tb} * \sin(\arccos(1 - (h/r))) \quad (9)$$

Hvor F_{tb} er tyngden over bakhjulet. Denne formelen gjelder også hvis det er to bakhjul som treffer kanten likt.

Med drift på både forhjul og bakhjul:



Figur 25: Situasjonen når et hjul som treffer en kant har et moment om akslingen og en kraft som dytter på akslingen.

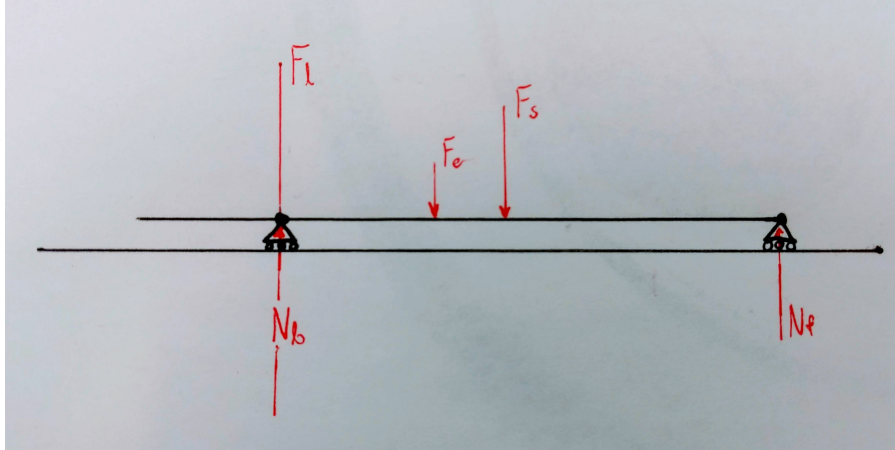
Ved å dele opp kreftene i de delene som presser dekket mot kanten og de delene som hindrer hjulet i å bevege seg opp kanten kommer man fram til:

$$\begin{aligned}
 \sum F_x &= F_M + F_{fx} - F_{vx} \\
 &= F_M + F_f \times \sin(\phi) - F_v \times \cos(\phi) \\
 &= F_M + F_f \times \sin(\arcsin((r-h)/r)) - F_v \times \cos(\arcsin((r-h)/r)) \\
 &= F_M + F_f \times ((r-h)/r) - F_v \times \cos(\arcsin((r-h)/r)) \\
 &\Rightarrow F_M + F_f \times ((r-h)/r) - F_v \times \cos(\arcsin((r-h)/r)) > 0
 \end{aligned}$$

Om hjulet skal over kanten må momentet og kraften tilsammen gjøre siste linje i ligningen over større enn null.

4.2.3 Mulig vekt og plassering av last på sykkelen

Plassering av vekt vil ha mye å si for fordelingen av normalkrefter på fronthjul og bakhjul, som igjen vil påvirke tilgjengelig friksjon for fremdrift. En sykkel kan forenkles til en bjelke festet i to punkter (akslingene) som kan roteres fritt og ruller mot underlaget.



Figur 26: Sykkel forenklet til en bjelke opplagret i sykkelens akslinger. F_l er tyngden av lasten over bakakslingen, F_e er sykkelens egenvekt, F_s er tyngden av sykliste og N_b og N_f er normalkreftene på bakhjulet og fronthjulet.

Normalkreftene kan regnes ut ved å velge en av akslingen som nullpunkt og se på momentene rundt denne. Velges bakakslingen som nullpunkt og lasten er sentrert over denne vil ikke lasten gi noe moment siden kraftens arm vil være lik null.

$$\sum M_b = M_e + M_s - M_f = F_e \times a_e + F_s \times a_s - N_f \times a_f = 0 \quad (10)$$

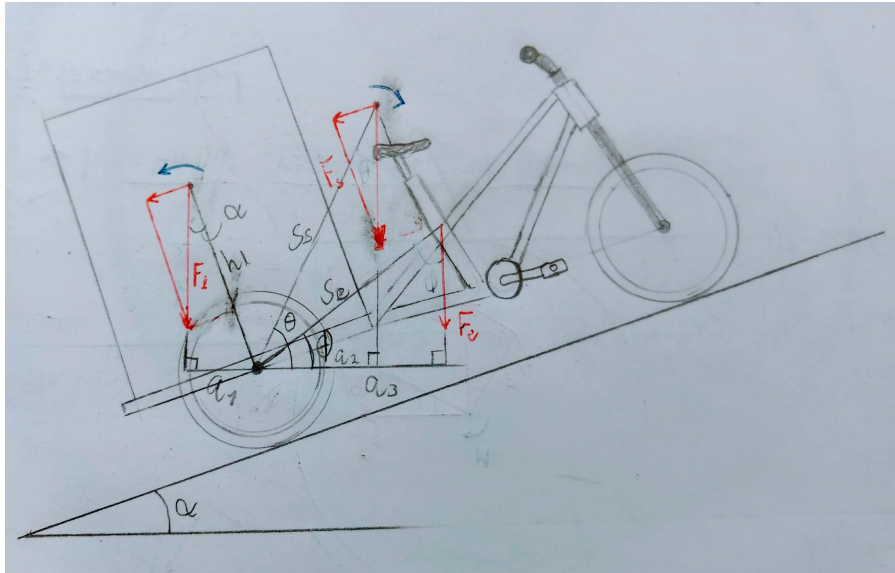
Når N_f er funnet kan N_b utregnes ved å se på alle kreftene i y-retning (rett opp fra bakken).

$$\sum F_y = F_l + F_e + F_s - N_f - N_b = 0 \quad (11)$$

I oppoverbakker vil kreftene fra vektene treffe skrått på sykkelen, som betyr at normalkreftene blir mindre og det vil oppstå krefter som drar sykkelen bakover. Den totale vekten påvirker kraften som drar sykkelen nedover uansett hvor den er plassert, men plasseringen av vekten vil ha mye å si for hvor stor kraft til fremkommelighet sykkelen har med tanke på friksjonskraft mellom bakke og hjul. I bratte bakker kan et høyt tyngdepunkt over bakakslingen begynne å tippe sykkelen bakover som gjør at forhjulet mister bakkekontakt og mer av vekten vil være over bakhjulet/-hjulene. Når sykkelen skal over hindringer ett hjul av gangen vil plasseringen av vekten ha mye å si for hvor sterkt momentet til fremdriften må være. Det er en forskjell på hvor sterkt momentet må være for å få hjul med drift og hjul uten drift over hindringer. Momentkravet er avhengig av hindringens høyde, hjulets radius og hvilke hjul som har fremdrift.

Er det motor i forhjulet er det viktig at forhjulet ikke mister bakkekontakt og begynner å spinne. Er det kun drift på bakhjulet/-hjulene vil det å flytte mer vekt

over bakakslingen gi mer friksjonskraft mellom hjul og bakken. Denne problemstillingen er viktigst med tanke på sykler som har lagringsplass over bakakslingen. Sykler som har lagringsplass over forhjulet vil ikke begynne å tippe over bakhjulet i oppoverbakker, men kan begynne å tippe over fronthjulet i nedoverbakker som vil skape problemer for bremsene.

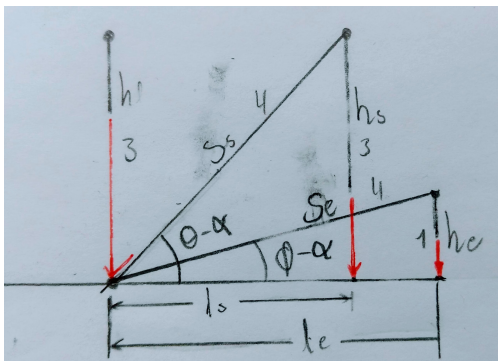


Figur 27: Sykkel i bakke med last som kan tippe sykkelen bakover.

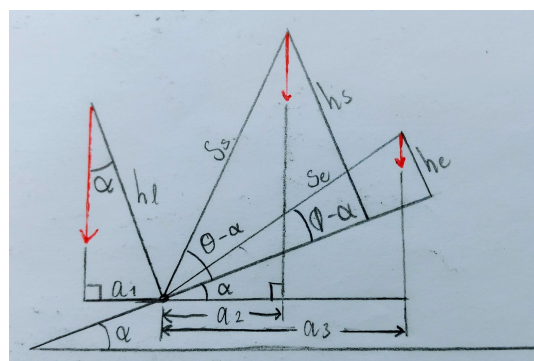
Grensen for når sykkelen vil tippe vil være når momentet rundt bakakslingen fra lasten i lasteplassen overvinner momentet fra syklistens vekt og sykkelens egenvekt.

Grense:

$$M_{last} = M_{syklist} + M_{egenvekt} \quad (12)$$



Figur 28: Forenkling av sykkel belastet med last over bakaksling, vekt fra syklist og egenvekten for en sykkel på flatt underlag.



Figur 29: Forenkling av sykkel belastet med last over bakaksling, vekt fra syklist og egenvekten for en sykkel på et underlag med helning.

Momentet fra syklisten og sykkelens egenvekt (om den er plassert mellom hjulene) synker desto brattere bakken er. Med null helning vil tyngdene treffe rett ned og vinkelen vil være enkel å finne så lenge man vet hvor tyngdepunktene er lokalisert med to av lengdene: avstand (S), høyde (h) eller lengde (l). Avstanden mellom bakakslingen, syklistens tyngdepunkt (S_s hvis syklisten beholder sittestillingen) og sykkelens tyngdepunkt (S_e) forblir konstant. Ved å bruke den originale vinkelen mellom S_s og l_s ($\theta - \alpha$) og S_e og l_e ($\phi - \alpha$) pluss vinkelen som bakken har (α) kan man regne ut den nye armen til momentet da S_l og S_e forblir konstant.

Moment i bakke for tyngdepunkter forran akslingen:

$$M = F * a = F * S * \cos(\arccos(l/S) + \alpha) = F * S * \cos(\arcsin(h/S) + \alpha) \quad (13)$$

Momentet fra tyngdepunkt plassert rett over akslingen blir:

$$M = F * a = F * h * \sin(\alpha) \quad (14)$$

Moment for tyngdepunkter bak akslingen:

$$M = F * a = F * S * \cos(\arcsin(h/S) - \alpha) = F * S * \cos(\arccos(l/S) - \alpha) \quad (15)$$

Om lastens tyngdepunkt er plassert rett forran bakakslingen blir formelen lik de for syklist og egenvekt. Men det kan være at lastens tyngdepunkt havner bak bakakslingen i bratte bakker. Formelen vil fortsatt fungere men svaret vil bli negativt som følge av at momentet har snudd retning.

Hvor mye moment som må til for å få et hjul over en hindring er avhengig av vekten som virker ned på akslingen og hvordan momentet blir overført til en kraft som greier å rulle hjulet over hindringen. Vekten bør bli plassert slik at den er fordelt på for- og bakaksling slik at det ene hjulet ikke blir mye tyngre å løfte enn det andre.

Forhjul over kant med drift kun på bakhjul:

$$\text{Ligning 8: } F_{\text{nødvendig}} = (F_{\text{last}} * \sqrt{2rh - h^2}) / (r - h) = F_{\text{last}} * (r * \sin(\arccos(1 - h/r))) / (r - h)$$

Bakhjul over kant med drift kun på bakhjul:

$$\text{Ligning 9: } F_{\text{nødvendig}} = F_{\text{last}} * \sin(\arccos(1 - (h/r)))$$

Optimal fordeling oppstår når ligning 8 er lik ligning 9:

$$\begin{aligned}
F_{bak} * \sin(\arccos(1 - (h/r))) &= F_{forran} * (r * \sin(\arccos(1 - h/r)))/(r - h) \\
\Rightarrow F_{bak} &= F_{forran} * (r * \sin(\arccos(1 - h/r)))/((r - h) * (\sin(\arccos(1 - (h/r)))))) \\
\Rightarrow F_{bak} &= F_{forran} * (r/(r - h))
\end{aligned}$$

Optimal fordeling av vekt for minst mulig nødvendig fremdrift på bakhjul:

$$F_{bak} = F_{forran} * (r/(r - h)) \quad (16)$$

For lik kraft for begge hjul må vekten fordelt på bakakslingen være $r/(r-h)$ ganger større enn vekten på forhjulet.

For sykler med motor i forhjul:

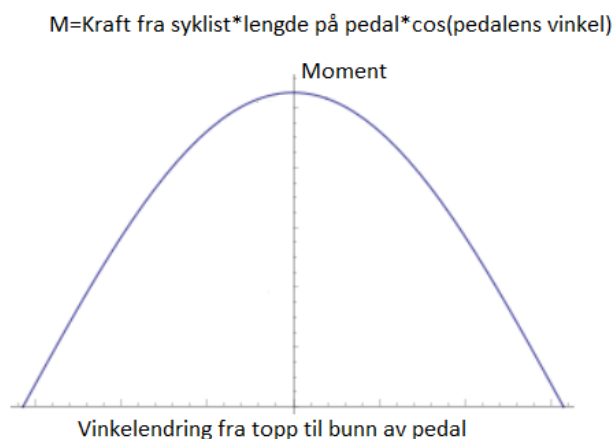
$$F_M + F_f * ((r - h)/r) - F_v * \cos(\arcsin((r - h)/r)) \geq 0 \quad (17)$$

4.2.4 Moment fra motor

De sterkeste motorene til Bosch og Bafang med effekt på 250W oppgir henholdsvis 75Nm[28] og 95Nm[29]. For å få motorer med mer moment fra disse leverandørene må effekten økes over den lovlige grensen. Flere andre leverandører som for eksempel Shimano oppgir 70Nm som maks moment[30].

4.2.5 Moment fra syklist

Om det brukes vanlige pedalen uten noe som fester foten til pedalen vil momentet fra syklisten variere fra null når pedalen er på topp til maks moment når kranker er horisontal. Maksimale moment er gitt av lengden fra midten av akslingen til der pedalen er festet i kranker og hvor mye kraft syklisten kan legge på pedalen. Om syklisten ikke er festet til sykkelen på noen måte eller kan lene seg på noe vil maksimal kraft som syklisten kan legge på pedalen være gitt av vekten til syklisten ganger gravitasjonsakselerasjonen.



Figur 30: Hvordan momentet endres fra pedalen er på topp av rotasjonene til den er på bunn. Maksimalt moment oppstår når pedalen står vannrett (vinkel lik 0).

Om syklisten har noe som holder kroppen fast, f.eks. en ryggstøtte, vil momentet være gitt av hvor sterk syklisten er og lengden på kranken. Om føttene til syklisten er festet til pedalen vil momentet være gitt av hvor sterk syklisten er, og momentet vil ikke være null når pedalen er vertikal da syklisten kan dra pedalen og ikke bare dytte.

Krank på 175mm og en person med en vekt på 70kg vil med pedaler uten fotfeste gi et moment på 120,17Nm når pedalen er horisontal. Dette er allerede mer enn momentet til motoren, men kan økes ved hjelp av fotfester, noe som holder syklisten fast til setet eller noe syklisten kan lene seg mot eller holde fast i slik at kraften ikke er begrenset av vekten til syklisten. Dette momentet kan utnyttes sammen med et gir med høy utveksling for høyt moment, men vil gi en lav hastighet. Dette vil fungere dårlig i bakker der syklisten bør holde en viss hastighet. Momentet vil variere fra null til maks så sykkelen bør ha nok fart til å rulle mens momentet bygger seg opp iløpet av ett tråkk. Moment fra syklist vil være mulig å utnytte for å komme over hindringer som sykkelen uansett bør klarere med lav hastighet.

4.2.6 Tilstrekkelig fart og akselerasjon

Sykkelens fart (V) regnes ut fra omdreiningshastigheten til hjulet (w) og hjulets radius (r):

$$V = w_{hjul} \times r_{sykkelhjul} \quad (18)$$

Om sykkelen skal være brukbar som kjøretøy for leveringer må den være effektiv på flat mark i tillegg til å kunne komme opp bakker. En kjedelig effekt av å øke momentet er at omdreiningshastigheten blir redusert i samme forhold som momentet økes. Girene må derfor ha et veldig stort spekter for å kunne gi stort nok moment når det trengs og fart når det er ønskelig. En enkel måte å få høyere moment uten å endre mye på eksisterende design av vare sykler er å kun endre størrelsen på tannhjulene ved pedalene, inn og ut på giret eller på bakakslingen. Men dette vil kun flytte girets spekter slik at moment økes på bekostning av fart, eller motsatt.

Vanligvis blir sykkelgir designet med liten forskjell i utvekslingen mellom girene, men det kan være stor forskjell mellom girene for de som er utviklet for å kjøre på flat mark og de som er utviklet for bakker. Det vil vanligvis kun være i de tyngste bakkene at sykkelen vil trenge de største utvekslingene og det at sykkelen går tregt i disse partiene kan tilgis så lenge den faktisk kommer seg opp.

Hvis sykkelen skal være funksjonell må den kunne oppnå en fart som ligger nærmest mulig hva som er sikkert. Farten blir begrenset av at sykkelen skal frakte tung last og den kommer til å være mer topptung enn en vanlig sykkel. Tyngden øker den kinetiske energien som gjør at bremselengden blir lenger desto tyngre sykkelen er. Å styre sykkelen blir også mer vanskelig i høy fart da det trengs mer energi for å endre sykkelens retning[27]. En topptung sykkel vil også lettere velte om sykkelen svinges i høy fart. Hjulene på sykkelen kan heller ikke tiltes til siden med en trehjulssykkel for å motvirke velting. Den høyeste mulige farten er derfor avhengig av flere beslutninger om design løsninger som bremsesystem, plassering av last, antall hjul og design av styremekanismen.

En doktorgrad fra NIH har kommet fram til at den minst energikrevende tråkkefrekvensen for syklistere som er lite trent og skal sykle langt rundt er ca. 60RPM[31], eller 1 runde med kranken per sekund. Hjulets omdreiningshastighet er lik tråkkefrekvensen ganger utvekslingen mellom kranken og hjulet. Utveksling er r_1/r_2 der r_1 er tannhjul festet til kranken og r_2 er tannhjul festet til hjulet. Sykkelen hastighet (V) er lik hjulets omkrets ganger hjulets omdreiningshastighet (w).

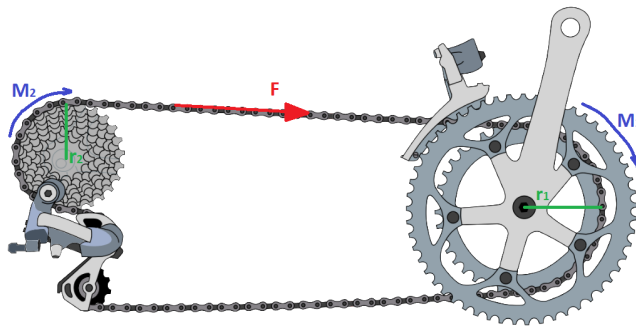
$$V = 2\pi r \times w_{krank} \times \frac{r_1}{r_2} \quad (19)$$

Når det skal fraktes tung last er det viktig at føreren av lasten har god kontroll. En syklist som sitter på et vanlig sykkelsete har kun sykkelhåndtakene å holde i for å ikke falle av sykkelen. Vanlige sykkelseter og pedaler gir ikke god støtte. På

grunn av syklistens utsatte posisjon vil en rolig akselerasjon være fordelaktig. Glatt og ujevnt underlag kan være overkommelig ved lav hastighet men kan bli farlig og ukontrollerbart ved høyere hastighet. Lav akselerasjon gir syklisten mulighet til å reagere på endringer i sykkelens oppførsel.

4.2.7 Nødvendig utveksling og girspekter

Uttekslingen som er nødvendig er gitt av forholdet mellom tilgjengelig moment fra motoren eller syklisten og nødvendig moment. Uttekslingen kan enkelt skrives som $\frac{r_2}{r_1}$ der r_1 er tannhullet som motoren og syklisten drar rundt og r_2 er tannhullet som er festet til hjulet. Det kan også brukes flere uttekslinger i serie for å oppnå nødvendig moment.



Figur 31: Eksempel på et gir med r_1 ved kranken og r_2 på bakhjul[18]

For sykler med motor i hjulet:

$$M_{n\ddot{u}dvendig} = M_{syklist} * \frac{r_2}{r_1} + M_{motor} \Rightarrow \frac{r_2}{r_1} = \frac{M_{n\ddot{u}dvendig} - M_{motor}}{M_{syklist}} \quad (20)$$

For sykler med krankmotor:

$$M_{n\ddot{u}dvendig} = M_{motor+syklist} * \frac{r_2}{r_1} \Rightarrow \frac{r_2}{r_1} = \frac{M_{n\ddot{u}dvendig}}{M_{motor+syklist}} \quad (21)$$

Girspekteret er gitt av forskjellen mellom nødvendig utteksling med tanke på moment og nødvendig utteksling med tanke på fart.

Med 1 runde per sekund og 1:1 utveksling og 24tommer hjul:

$$V = 2\pi * 0,305m * 1 \frac{1}{s} = 1,91 \frac{m}{s} \Rightarrow 6,90km/t \quad (22)$$

For å øke farten til en ønsket hastighet uten at syklisten må trække så raskt at det vil bli slitsomt må tannhjulet koblet til hjulet (r_2) være større enn tannhjulet som er festet til pedalene (r_1).

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{2 * \pi * r * w}{V} \quad (23)$$

For å oppnå 25km/t, som er maks fart for motoren, med 60RPM trengs en utveksling på:

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{2 * \pi * 0,305 * 1 * \frac{25}{3,6}}{60} = 0,275 \quad (24)$$

Startassistansen lar motoren drive sykkelen uten at pedalene roterer opp til 6km/t eller 1,67m/s. Om syklisten ikke skal måtte trække raskere enn det som er behagelig for normale folk og holde samme fart som det startassistansen kan gjøre blir maksimal utveksling:

$$r_2/r_1 = (2 * \pi * r * w)/1,67 \quad (25)$$

Med en krankrotasjon i sekundet og 24tommer hjul:

$$r_2/r_1 = (2 * \pi * 0,305 * 1)/1,67 = 1,15 \quad (26)$$

4.3 Eksisterende løsninger

Dette delkapittelet tar for seg hvilke løsninger som allerede finnes på markedet og hvordan de fungerer og hvilke alternativer som finnes når det skal designes en elsykkel for varetransport.

4.3.1 Avhoppsgir

Den mest brukte gir mekanismen for sykler heter derailleur eller avhoppsgir og består av tannhjul med forskjellig størrelse som kobler kranken til bakhjulet ved

hjelp av et kjede. Momentet økes ved at kjedet er koblet til et tannhjul på bakhjulet som er større enn det som er koblet til kranken. Fart økes ved å ha større tannhjul på kranken enn det som er festet til bakhjulet.

En veldig enkel løsning er å øke forskjellen på radiusene til tannhjulene. Men det er klart at det vil bli et problem å få til en stor økning med bare to tannhjul som må kunne brukes sammen med et kjede. Tannhjulene må ha store nok tagger for god kontakt med kjedet som begrenser hvor små de kan lages. Dette gjør at en stor momentøkning (stor utveksling) vil kreve et veldig stort tannhjul på bakhjulet.

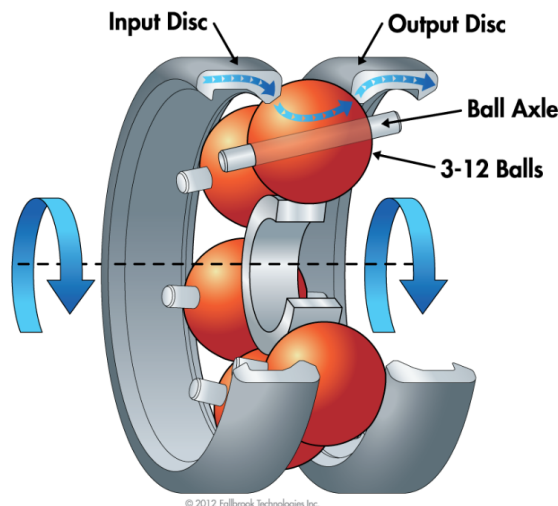
Avhoppsgir bytter gir på bakhjulet ved hjelp av en girskifte mekanisme som drar kjedet til høyre og innover eller til venstre og utover (sett bakfra).



Figur 32: Girskiftet på bakhjulet for et avhoppsgir[32]

4.3.2 Navgir

Navgir er forskjellige typer gir som er plassert i navet på sykkelhjulet. Planetgir er en mye brukt løsning som har blitt utviklet fra å kun bruke ett enkelt planetgir til å bruke flere i serie for å ha et stort spekter av forskjellige utvekslinger. En annen type teknologi som blir brukt er trinnløse gir kalt CVT (continuously variable transmission). Fordelene med CVT er at syklisten kan stille inn utvekslingen akkurat slik de ønsker og at girskiftet skjer øyeblikkelig uten stopp i fremdriften[33].



Figur 33: Oppbygningen til er trinnløst NuVinci gir laget av Fallbrook technologies [33]. Giret endrer utvekslingen ved å ha pådrag fra syklisten og kraftutvekslingen til hjulet på forskjellige punkter av en ball med forskjellig radius i forhold til akslingen gjennom ballen. Ved å endre vinkelen på ballens aksling endres forholdet mellom radiusene og gir en utveksling på $\frac{r_{ut}}{r_{inn}}$

En ulempe med navgir er at de har begrenset størrelse da de plasseres inne i hjulet. Størrelses begrensningen kommer hovedsakelig fra hjulets tykkelse. Hjulets radius vil trolig ha plass til et planetgir som vil gi tilstrekkelig moment, men begrensningen i tykkelsen gjør at girets spekter blir liten som følge av et begrenset antall seriekoblinger.

4.3.3 Girkasse

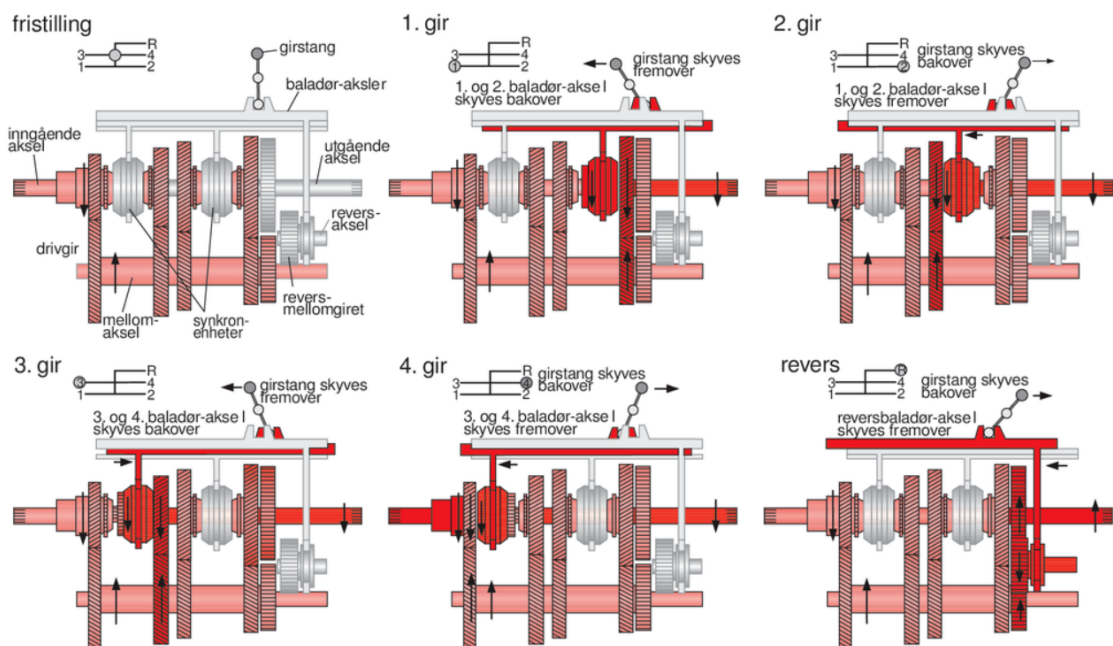
En girkasse mellom pedalene og bakakslingen kan øke momentet eller farten drastisk da det er mulig for flere koblinger å jobbe sammen. Girkasser gjør det også enklere å ha større sprang mellom gir i forhold til derailleur og navgir laget for sykler. Navgir som bruker planetgir kan sees på som en type girkasse. Designet for navgir med planetgir kan enkelt tas ut av navet og dimensjoneres etter ønske utenfor hjulet. For vanlige sykler vil det bli et plassproblem med tanke på gir med store eller mange tannhjul, men designet av varesykkelen kan tilpasses for å lage plass til en girkasse mellom kranken og bakakslingen.

Det er mange forskjellige typer girkasser. De vanligste er manuelle girkasser for biler og motorsykler, og automatiske girkasser for biler. Det finnes allerede girkasser for

sykler som er laget for å sitte mellom pedalene. Dette vil ikke fungere sammen med en krankmotor. Eksisterende teknologi kan modifiseres for å kunne plasseres mellom krank og bakaksling.

Det er hovedsakelig to typer girløsninger som brukes i girkasser: planetgir og akslinger med tannhjul. Manuelle girkasser bruker som regel akslinger og automatiske girkasser bruker som regel planetgir, men både planetgir og akslinger kan brukes som manuelt eller automatisk gir om ønskelig.

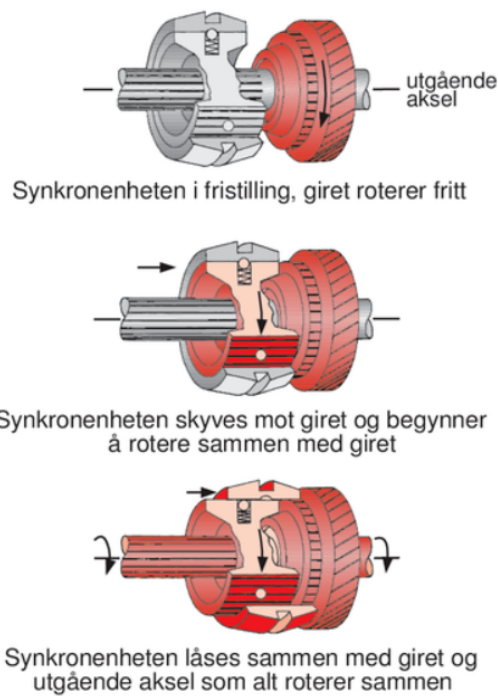
Akslinger med tannhjul:



Figur 34: Manuell girkasse for biler[34]

Denne typen gir gjør det enkelt å få riktig utveksling da det kun er størrelsesforholdet mellom tannhjulene som bestemmer utvekslingen. Det er mulig å ha store sprang mellom utvekslingenene til de forskjellige girene.

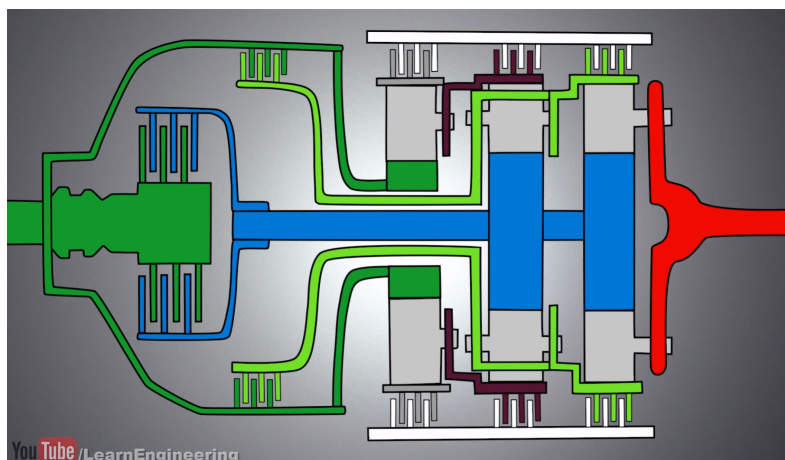
Girskifter kan utføres på forskjellige måter. I det fleste gir i biler og motorsykler brukes det synkronenheter som kobler de forskjellige tannhjulene til akslingen.



Figur 35: Virkemåten til en synkronenhet[34]

Planetgir:

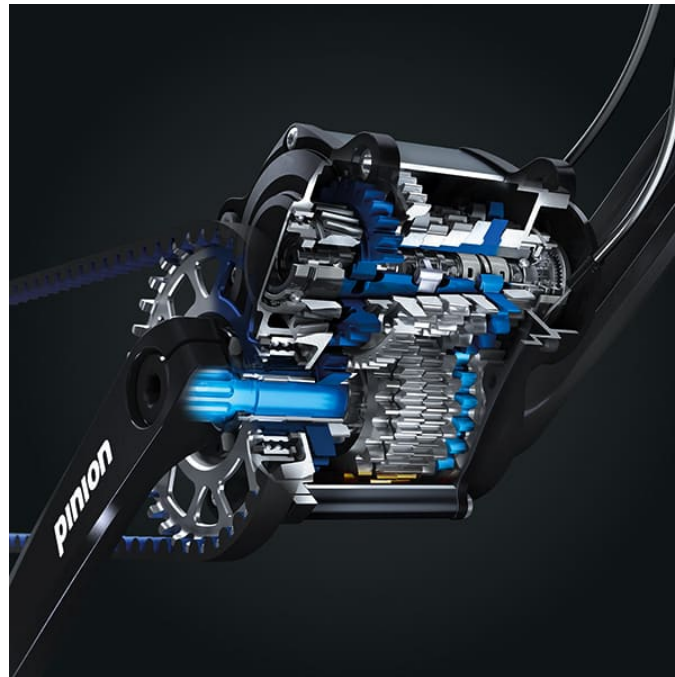
Akslinger kan festes til solhjulet, planethjulholderen eller ringhjulet for å oppnå forskjellige utvekslinger. I en automatisk girkasse på biler brukes dette sammen med flere clutch koblinger for å få en jevn overgang mellom girene uten at noen tannhjul må kobles inn og ut (som kan føre til gnisninger, støy og slitasje). Planetgir kan kobles i serie for å øke utvekslingen og for å få flere variasjoner. Planetgir kan også brukes til å snu rotasjonsretningen.



Figur 36: Snitt av en automatisk girkasse for en bil[35].

4.3.4 Pinion

Pinion gir er en type sykkelgir som ligner på girkasser som brukes i motorsykler. Giret er laget for å sitte mellom pedalene. Dette gjør at denne løsningen ikke kan brukes sammen med en krankmotor viss ikke giret eller motoren flyttes til en annen plass på sykkelkelen. Det vil være enkelt å bytte ut pedalene med et tannhjul på en av sidene.

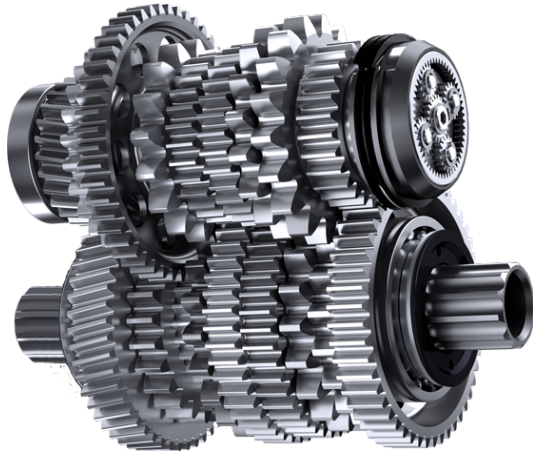


Figur 37: Delsnitt av et Pinion gir[36]. Kraften blir overført fra den lyseste blå akslingen som er koblet til pedalene til den andre akslingen som er en mørkere blå, og til sist til det ytre tannhjul ved hjelp av et indre tannhjul farget mørkeblåt

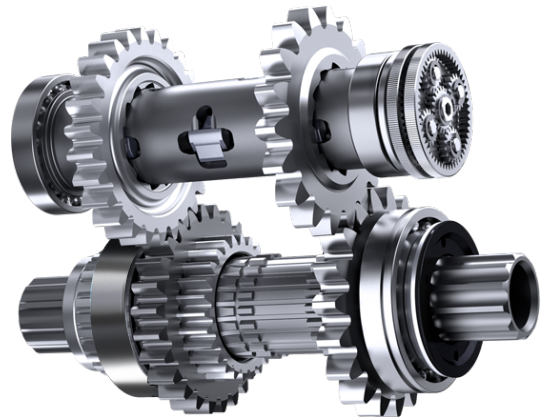
Pinion bruker tannhjul på akslinger hvor kranken er koblet til en aksling, kraften blir overført til den andre akslingen ved hjelp av et sett tannhjul som gir forskjellige utvekslinger. Den andre akslingen kobles til en tredje aksling som ligger utenpå den første akslingen som er koblet til tannhjul som dra reimen/kjedet. Momentet blir dermed omformet to ganger før det drar reimen/kjedet. Først mellom den første og den andre akslingen, og så mellom den andre akslingen og den tredje som drar det ytre tannhjul rundt.

Tannhjulene på den andre akslingen kan rotere fritt rundt akslingen. Girbytter skjer ved hjelp av tapper som kan komme ut av akslingen og hekte seg fast til tannhjulene som da vil dra akslingen rundt. Det er to sett med tannhjul på den andre akslingen.

Det første settet brukes sammen med tannhjulene på den første akslingen og har mindre endringer i utvekslingene. Det andre settet brukes sammen med tannhjul på den tredje akslingen som har større sprang mellom utvekslingene. Dette gjør bruken veldig lik et standard avhoppsgir hvor det første settet vil gjøre jobben til det bakre settet på avhoppsgiret med små endringer, og det andre settet vil gjøre samme jobben som tannhjulene på kranken som gir større endringer i utvekslingen.



Figur 38: Tannhjul inne i en Pinion gir-kasse. De tre til venstre er koblet til utgangen, mens de seks til høyre er koblet til akslingen drevet av pedalene[36]



Figur 39: Tannhjulene på de nedreste akslingene (den til venstre ligger utenpå den andre) sitter fast i akslingene. De øverste blir valgt med tapper som blir dyttet ut av girmekanismen på innsiden av akslingen[36]

	P1.18	P1.12	P1.9^{XR}	P1.9^{CR}
Number of gears	18	12	9	9
Overall ratio %	636	600	568	364
Gear steps %	11,5	17,7	24,3	17,5
Frame connection	Pinion Standard	Pinion Standard	Pinion Standard	Pinion Standard
Gain ratio in first gear	1,82	1,82	1,82	1,30
Gain ratio in fastest gear	0,29	0,3	0,32	0,36
Sprocket / Spider mount	Pinion Center Lock	Pinion Center Lock	Pinion Center Lock	Pinion Center Lock
Chain line	54 mm	54 mm	54 mm	54 mm
Maximum input torque	250 Nm	250 Nm	250 Nm	250 Nm
Axle standard	Pinion Standard	Pinion Standard	Pinion Standard	Pinion Standard
Q-factor	174 mm	174 mm	174 mm	174 mm
Lubrication	Splash lubrication	Splash lubrication	Splash lubrication	Splash lubrication
Oil type	Pinion gearbox oil	Pinion gearbox oil	Pinion gearbox oil	Pinion gearbox oil
Oil capacity	60 ml	60 ml	60 ml	60 ml
Temperature range	5 °F to 104 °F	5 °F to 104 °F	5 °F to 104 °F	5 °F to 104 °F
Oil change interval	Every 10.000km / Once a year	Every 10.000km / Once a year	Every 10.000km / Once a year	Every 10.000km / Once a year
Gearbox Weight	2700g	2350g	2200g	2200g

Figur 40: Spesifikasjonene til Pinion sine gir[36]

Med en maksimum verdi på moment inn på 250Nm og en gir ratio på 1,82 i første gir kan et P1.18 gir kunne gi 455Nm. Pinion er laget for å få moment direkte fra pedalene så 250Nm vil tilsvare at en person på 145,6kg står med hele sin vekt på en 175mm krank som er helt vannrett. Det er derfor veldig usannsynlig at giret vil kunne nå maks grensen for moment inn når det er koblet rett på kranken uten ekstra moment fra motor. Om giret plasseres bak kranken med en krankmotor som yter 70Nm trengs det en person på bare 105kg i tillegg for at momentet skal tilsvare maksimalt moment inn på et Pinion gir. Dette er med en 1:1 utveksling mellom krank og gir. Skal et pinion gir brukes mellom krank og bakaksling bør utvekslingen mellom krank og giret være mindre enn 1 for å ikke kunne risikere at giret blir utsatt for mer moment enn det er laget. Den totale utvekslingen kan økes på nytt etter giret med et større tannhjul på bakakslingen.

4.3.5 Plassering av motor

Navmotorer i hjulene vil ikke dra nytte av gir mellom pedaler og bakaksling, til dette må det brukes en krankmotor. Om det skal være forskjellige dekk for forskjellig føre vil navmotorer gjøre det ekstra vanskelig eller ekstra dyrt å skifte dekk. Enten må det byttes dekk på sykkelhjulet som tar tid eller så må det være flere hjul med hver sin navmotor som blir dyrt. Skal hjulene ha forskjellig bredde vil det ikke være mulig å bare bytte dekket, hele hjulet må byttes. Det kan være mulig å lage en motor som kan byttes mellom hjul, men dette vil kreve ekstra investeringer i utvikling og produksjon.

Krankmotorer eller motorer plassert mellom krank og gir kan dra nytte av giret. For at motoren skal kunne ta seg av mesteparten av momentet som er et ønske fra kunden må det høyst trolig ha hjelp fra et gir når det kommer til sykler med tung last. Ved å ha en motor før et gir kan motoren kjøres i en høyere hastighet enn det syklisten klarer å trække for å gjøre opp for den tapte rotasjonshastigheten når utvekslingen er laget for høyt moment. Til dette kan startassistansen brukes for å kjøre motoren helt uten bruk av kranken opp til 6km/t.

4.3.6 Differensial

Problemet med drift på begge bakhjulene er at om de roterer med samme hastighet vil ikke sykkelen kunne svinge da det ytterste hjulet må rotere raskere enn det innerste. Dette problemet blir som regel løst med en differensial som kan overføre kraft til to hjul med forskjellig hastighet. Et problem med enkle differensialer er at all kraft vil tilføres det hjulet som har minst rotasjonsmotstand, som betyr at hvis et av hjulene begynner å spinne på glatt føre vil alt pådraget tilføres dette hjulet. Dette kan løses med en differensialsperr som reagerer på høy rotasjonshastighet (f.eks. ved varmeutvikling) og fordeler kraften likt til begge hjulene.

4.3.7 Antispinn

Som forklart i 4.2.1 er friksjonskraften størst ved statisk friksjon. Hvis et hjul begynner å spinne synker friksjonskraften og hjulet vil fortsette å spinne til noe endrer normalkraften, friksjonskoeffisienten eller momentet på hjulet. For å unngå at hjulet fortsetter å spinne bør momentet senkes til det slutter å spinne, så kan momentet økes på nytt for å prøve å flytte sykkelen med statisk friksjon. Dette kan styres

automatisk ved hjelp av antispinn teknologi. Når motoren begynner å spinne går friksjonskraften raskt ned og hjulet vil akselerere veldig raskt, mye raskere enn sykkelen noen gang vil akselerere. Elektronikk kan registrere denne unormale akselerasjonen og styre motoren slik at hjulet slutter å spinne, for så å rolig starte det igjen. Det å prøve å akselerere sykkelen veldig raskt vil kreve en større kraft ($F=m*a$) som gjør at friksjonen kan overvinnnes. Derfor vil det være bedre for motoren å starte rolig, spesielt etter at den har stoppet på grunn av hjulspinn da hjulspinn betyr at det er dårlig friksjon mellom dekk og underlag. Om det trengs en kraft som er nær maksimal friksjonskraft mellom dekk og bakke vil antispinn på motoren kunne hjelpe syklisten der det trengs mange stopp i pådrag og rolig oppstart som kan bli problematisk og slitsomt for syklisten å gjøre manuelt.

4.3.8 Moment- eller rotasjonssensor

Sykler med momentsensor føler hvor hardt syklisten trækker og gir et motorbidrag som samsvarer med hvor hardt syklisten trækker. Dette gjør tråkket i seg selv sterkere og øker momentet fra syklisten. Bidraget kan normalt stilles inn av syklisten etter ønske. Det vil være mulig å programmere inn at motoren skal gi 100 prosent uansett hvor liten kraft syklisten bidrar med. Momentsensoren vil registrere at syklisten trækker før pedalene begynner å rotere som kan være nødvendig i situasjoner der sykkelen er tung å få i bevegelse. Hvis akslingen i kranken blir dratt fort rundt av en krankmotor blir det vanskelig for syklisten å legge kraft i tråkket da syklisten må trække raskere enn det motoren kjører for at kranken skal ta grep på akslingen.

Rotasjonssensorer reagerer på at at pedalene roterer og gir et instilt bidrag med en gang rotasjonen er registrert. Med rotasjonssensor slår motoren inn først etter at bevegelsen er startet. Pedalene vil ikke gå rundt om ikke sykkelen kjører fremover som betyr at syklisten må starte bevegelsen på egenhånd før motoren begynner å hjelpe. Om startassistansen kan få sykkelen i bevegelse kan dette løse problemet med oppstart, men det betyr at motoren må klare å sette igang sykkelen på egen hånd.

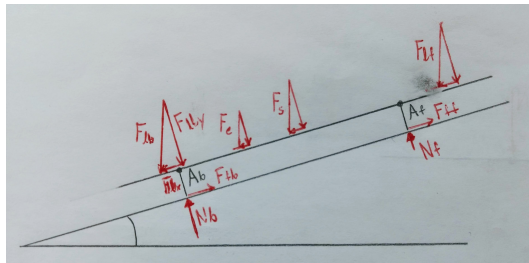
4.4 Fremgangsmåte for konseptvalg

Hovedesignet på sykkelen vil høyst trolig bli valgt etter kundens ønsker, behov og hvordan produktutvikleren og kunden tror at disse kan bli møtt. Dette vil inkludere om lasten skal være forran, bak eller begge deler, hvordan syklisten skal sitte på

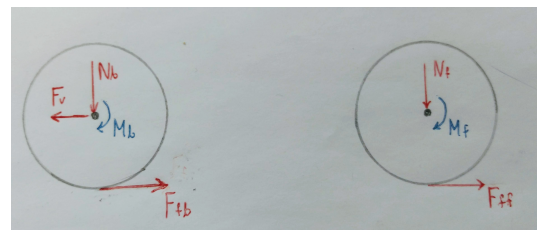
sykkelen og hvor mange hjul sykkelen skal ha. Utvikleren kan enkelt tegne opp et design som rommer det kunden krever av lasterom, og tilfredsstillende komfort og utseende.

Når dette er gjort må designet testes for praktikalitet, og nødvendige designvalg må vurderes for å oppnå kundens ønsker og krav. Dette kan i første omgang gjøres ved å vurdere tillegg til sykkelen som for eksempel differensial eller forskjellige løsninger for motor og gir. Om dette er nok for å oppfylle kriteriene og er fysisk og økonomisk mulig vil det være mulig å gå videre til detalj design og testing. Men om det ikke finnes løsninger som gjør det originale designet brukbart kan det sees på alternativer. Last kan kanskje omplasseres, syklistens sittestilling kan kanskje endres for å kunne få mer moment osv. Hvis heller ikke det er nok for å oppfylle kravene må det sees på nye innovative løsninger.

For å ha oversikt over mulige løsninger og de kollektive konsekvensene av designendringer kan ligningene fra 4.2 brukes som en ledetråd på hvordan sykkelen kommer til å prestere. Alle kreftene fra vekt, motor og syklist blir samlet i krefter som gir normalkrefter og krefter som vil flytte sykkelen langs bakken (for eksempel vekt som drar sykkelen ned bakker og moment på hjulet som gir krefter for å flytte sykkelen).



Figur 41: Forenkling av vekt plasser på sykkel som står i en bakke.



Figur 42: Forenkling av krefter og moment på sykkelhjulene.

Fra figur:

F_{lb} : Kraften som kommer av vekten til lasten bak på sykkelen

F_{lf} : Kraften som kommer av vekten til lasten foran på sykkelen

F_e : Kraft fra sykkelens egenvekt

F_s : Kraft fra syklisten sin vekt

N_b : Normalkraft på bakhjul

N_f : Normalkraft på fronthjul

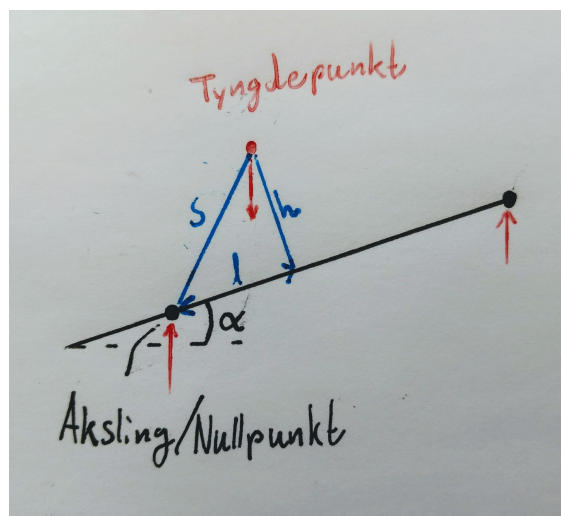
F_{fb} : Kraft fra bakhjulet som driver sykkelen fremover

F_{ff} : Kraft fra fronthjulet som driver sykkelen fremover
 F_v : Samlet kraft fra all vekt som drar sykkelen bakover
 M_b : Moment på bakhjul fra motor og/eller syklist
 M_f : Moment på fronthjul fra motor

Når sykkelens design er bestemt kan kreftene regnes ut hvis det er klart hvor mye vekt sykkelen skal lastes med, hvor denne vekten skal plasseres, hvilken friksjonskoeffisient det skal regnes med og hvor bratte bakker sykkelen skal opp. Kreftene vil bli konsentrert på sykkelens akslinger. Når kreftene er samlet er det lett å finne ut hvor mye moment som er mulig å utnytte og hvor mye som er nødvendig.

Steg 1: Utregning av normalkrefter

Lag en skisse av designet med plassering av last, syklist og prøv å plassere sykkelens tyngdepunkt. Finn ut hvor bratte bakker sykkelen skal opp. Simplifiser sykkelen til en bjelke opplagret i to akslinger med tyngdepunktene til lastene, syklisten og egenvekten plassert over eller på bjelken. Tyngdepunktene på ha en kjent plassering med en fast avstand fra aksling (S), og enten en høyde fra bjelken (h) eller en lengde (l) som går fra akslingen til punktet der man kan vinkelrett opp til tyngdepunktet.



Figur 43: Eksempel på plassering av tyngdepunkt i forhold til en av akslingene.

Når tyngdepunktene er lokalisert kan Normalkreftene utregnes:

$$\sum M_b = \sum M_f - \sum M_b - \sum M_r - M_N = 0 \quad (27)$$

Der $\sum M_b$ er momentene rundt akslingen, $\sum M_f$ momentene fra tyngdepunkter foran akslingen, $\sum M_b$ momentene fra tyngdepunkter bak akslingen, $\sum M_r$ mo-

mentene fra tyngdepunkter rett over akslingen og M_N momentet fra normalkraften på den andre akslingen. Positiv retning er med klokken og oppover (y-retning).

$$\sum F_y = N_f + N_b - \sum F = 0 \quad (28)$$

Der $\sum F_y$ er summen av alle krefter i y-retning, $\sum F$ er all tyngden på sykkelen (inkludert egenvekt) og N_f er normalkraften foran og N_b er normalkraften bak.

Moment i bakke for tyngdepunkter foran akslingen og normalkraft under hjul (negativ, retning mot klokken):

$$M = F * a = F * S * \cos(\arccos(l/S) + \alpha) = F * S * \cos(\arcsin(h/S) + \alpha) \quad (29)$$

Momentet fra tyngdepunkt plassert rett over akslingen blir:

$$M = F * a = F * h * \sin(\alpha) \quad (30)$$

Moment for tyngdepunkter bak akslingen:

$$M = Fa = F * S * \cos(\arcsin(h/S) - \alpha) = F * S * \cos(\arccos(l/S) - \alpha) \quad (31)$$

Steg 2: Utregning av friksjon

Når normalkreftene er funnet kan tilgjengelig friksjonskraft (kraft til fremdrift) regnes ut. Det vil kun være friksjonskraften til hjul med drift som har et bidrag på fremdriften. Er det to hjul på noen av akslingene må normalkraften deles på to hvis det kun er drift på ett av hjulene. Er det flere hjul med drift, for eksempel ved bruk av motor i fronthjul eller differensial, blir den totale kraften til fremdrift summen av disse.

Friksjonskraft på et hjul med drift:

$$F_r = \mu * N \quad (32)$$

Steg 3: Regn ut nødvendig kraft for fremdrift.

Nødvendig kraft i bakker med en stigningsvinkel α :

$$F_{n\ddot{o}dvendig} = F_{vekt} * \sin(\alpha) \quad (33)$$

Om $F_{n\ddot{o}dvendig}$ er større en kraften til fremdrift må det vurderes endringer på sykkeldesignet. Dette vil høyst trolig være å flytte last for å få mer friksjon på hjul

med drift, eller å bruke andre motorløsninger som for eksempel krankmotor istedet for navmotor i fronthjul. Differensial kan være en god løsning for sykler med to bakhjul.

Steg 4: Finn nødvendig moment og utveksling.

Momentet på hjulene vil gi en kraft mellom bakke og hjul med en gitt radius (r) lik:

$$F = \frac{M}{r} \quad (34)$$

Nødvendig moment for å drive sykkelen fremover:

$$M_{n\ddot{o}dvendig} = F_{n\ddot{o}dvendig} * r \quad (35)$$

Nødvendig utveksling for moment med en krankmotor:

$$u_m \frac{r_2}{r_1} = \frac{M_{n\ddot{o}dvendig}}{M_{tilgjengelig}} \quad (36)$$

Med en krankmotor vil $M_{tilgjengelig}$ være summen av motorens moment og momentet man regner med at syklisten kan bidra med.

Med navmotor vil ikke motorens moment bli økt gjennom giret. Det vil kun være syklisten som får økt sitt pådrag. Nødvendig utveksling for momten (u_m) blir da:

$$u_m = \frac{r_2}{r_1} = \frac{M_{n\ddot{o}dvendig} - M_{motor}}{M_{syklist}} \quad (37)$$

Det er viktig å huske at fronthjul ofte ikke har god bakkekontakt i bratte bakker og dermed ikke kan bidra med maksimalt moment på grunn av manglende friksjon. Dette vil gjøre utvekslingen mellom syklist og bakhjul enda større.

Steg 5: Bestem nødvendig utveksling for fart

Akkurat hvor fort sykkelen skal kunne gå er opp til hver utvikler. Tunge varesykler behøver trolig ikke å gå så fort som sykler som kun skal frakte et menneske.

Fart (V) er gitt av syklisten tråkefrekvens (w), hjulets omkrets ($2\pi * r$) og utvekslingen mellom krank og hjul ($\frac{r_2}{r_1}$):

$$V = \frac{2 * \pi * r * w * \frac{r_2}{r_1}}{r_1} \quad (38)$$

Nødvendig utveksling for ønsket fart (u_f):

$$u_f = \frac{r_2}{r_1} = \frac{2 * \pi * r * w}{V_{\ddot{o}nsket}} \quad (39)$$

Steg 6: Finn nødvendig girspekter med tanke på moment og fart

Nødvendig girspekter vil være forholdet mellom nødvendig utveksling for moment (u_m) og nødvendig utveksling for fart (u_f):

$$\frac{u_m}{u_f} \quad (40)$$

Steg 7: Velg løsninger

Iløpet av steg 1-6 bør det bli klart hvilke designløsninger som vil fungere. Er det for eksempel lite friksjon på fronthjul er det lite optimalt å ha en navmotor i fronthjulet. Er det to hjul bak men drift på kun ett av dem, og fremdriften må økes på grunn av tung last og bratte bakker, kan differensial være en god løsning for å utnytte hele vekten over bakakslingen. Akkurat hvilke løsninger som velges vil være opp til hvert prosjekt. Løsningen må passe med kundens ønsker. Det utvikles konstant nye løsninger som kan vurderes så det vil være lurt for etthvert prosjekt å ta en grundig gjennomgang av markedet.

Typer gir:

Avhoppsgir

Planetgir

CVT

Girkasse

Typer motor:

Navmotor i fronthjul

Navmotor i bakhjul

Krankmotor

Andre løsninger:

Differensial

Antispinn

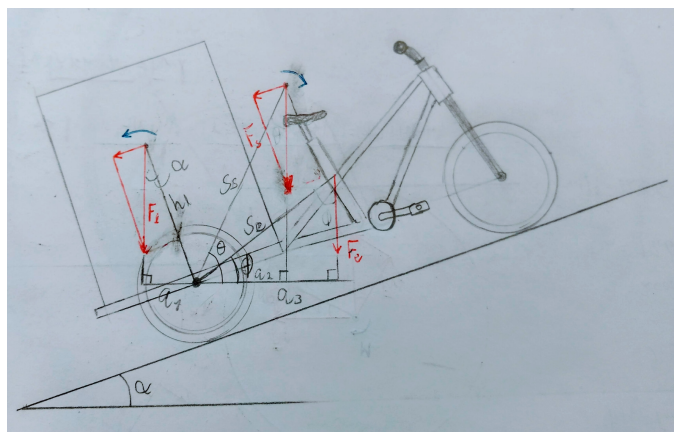
4.5 Design for transportavdelingen

Under samtaler og intervjuer med transportavdelingen har det kommet fram at kunden ønsker et design lignende Musketier sykkelen fra EVO elsykler som vist på

figur 44. Sykkelen skal ha tre hjul for at sykkelen skal være lett og sikker å bruk selv med tung last, og for at sykkelen skal stå trygt. Lasten skal plasseres bak syklist slik at det er mindre begrensninger for utforming og størrelse på last. Sykkelen skal kunne komme seg fram hele året. Driftsavdelingen har selv ansvar for måking og strøing av veier så dyp snø vil ikke bli et problem, men det kan være glatte partier. Muskieter sykkelen har et lasteplan med en grunnflate på 100cm ganger 75cm, som kan utrustes med et lasteplan med 160cm lengde[37]. Dette passer veldig bra med tanke på transportavdelingens ønsker om et lasteplan på størrelsen med burene de bruker til mellomlagring på sentralen (74x150x113).



Figur 44: Designet transportavdelingen selv valgte fra en gruppe eksempler[37]. Denne versjonen av Muskieter sykkelen er utrustet med et lasteplan som er 150cm langt.



Figur 45: Tegning for å vise krefter som påvirker en sykkel lignende Muskieter.

Hvis vi bruker Muskieter som et eksempel på vekt kan vi regne med at sykkelen veier 58kg uten lasteplanet[37]. Sykkelen skal kunne brukes av alle voksne mennesker så vekten av syklisten er ikke mulig å forutsi nøyaktig. Vekten av lasten er også umulig

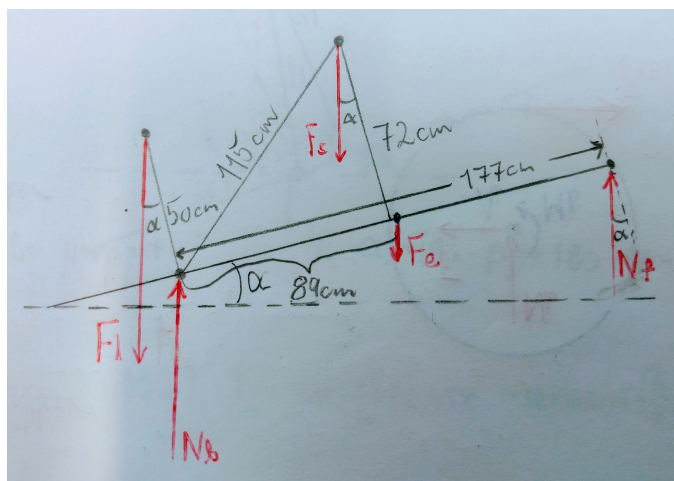
å forutsi da det ikke er mulig å vite hva instituttene på NTNU Gløshaugen kommer til å bestille. Tyngden av syklisten og lasten vil bli slått sammen til maksimum nyttelast, som betyr at lettere syklist kan ha med seg tyngre last enn en tyngre syklist kan.

Hvor mye vekt sykkelens skal frakte vil bli beregnet konservativt. Sykkelen må ha et lasterom som kan låses slik at pakker kan ligge trygt mens syklisten går inn i bygg for å levere pakker. Lasterommet må også kunne beskytte pakker mot fuktighet, så det må være solid og tett. Det regnes med at dette kan komme til å øke sykkelens egenvekt fra 58kg til nærmere 80kg. Sykkelen skal kunne brukes av alle typer mennesker, fra en liten person på 60kg til en stor person på 120kg eller tyngre. Ekstra utstyr som var ønsket av brukerne som dekning mot regn og snø og ting som ABS utstyr vil også legge til ekstra vekt. Uten å overdrive kan det enkelt tenkes at sykkelens vekt med syklist fort blir opptil 200kg. Vekten av lasten som skal fraktes er umulig å forutsi men det vil bli brukt 200kg som et eksempel for å se om dette er mulig å oppnå og hva som eventuelt må til for å få til dette. Dette vil føre til at den totale vekten kommer på 400kg, som bare er 100kg mer enn den totale tillatte vekten for en standars Musketier[37]. Steg 1: Normalkrefter

De lengste lasteplanene på en Musketier er plassert med litt mer plass bak bakakslingen. Men om lasten skal festes under frakt vil dette trolig gjøres innerst i lasterommet. Derfor regnes det videre med at lastens tyngdepunkt er plassert direkte over bakakslingen. Vekten av lasterommet blir slått sammen med resten av lasten. Vekten av syklisten og sykkelens egenvekt vil havne et sted mellom akslingene.

Brukes Brubakken i Trondheim som et eksempel på en veldig bratt bakke har vi en vinkel på 11.3° .

Utifra figur 4.5 kan plasseringen av syklistens tyngdepunkt og lengde mellom akslingene beregnes fra lasteplanets lengde. Sykkelens tyngdepunkt er vanskelig å beregne uten å ha et eksemplar av sykkelens. Hvilke løsninger for motor og gir som blir valgt vil endre sykkelens vekt og tyngdepunkt. For å gjøre utregningene enklest mulig regnes sykkelens tyngdepunkt å være midt mellom akslingene siden det ikke er noen god måte å finne ut nøyaktig plassering uten et fysisk eksemplar.



Figur 46: Fordeling av vekt på en sykkel med mål beregnet fra figur ??

Vekt plassert rett over aksling: $M = F * h * \sin(\alpha)$

Vekt plassert foran aksling: $M = F * (S * \cos(\arcsin(h/S) + \alpha))$

Vekt plassert bak aksling: $M = F * (S * \cos(\arcsin(h/S) - \alpha))$

Vekt plassert på høyde med akslingene: $M = F * \cos(\alpha) * a$

For tyngden av lasten inkludert lasterom brukes $F_l = 2500N$ med et tyngdepunkt på $h_l = 0,50m$. For tyngden av syklisten brukes $F_s = 800N$ med tyngdepunktet gitt av $h_s = 0,72m$ og $S_s = 1,15m$. Egenvekten av sykkelen regnes med å være på høyde med akslingene og ha en kraft på $F_e = 600N$ og $a_e = 0,89m$. Normalkraften på fronthjulet har $a_N = 1,77m$. For bakken stigningsvinkel brukes $\alpha = 11,3^\circ$

$$\sum M_{bakaksling} = M_l - M_s - M_e + M_f = 0$$

$$\Rightarrow 0 = F_l \times h_l \times \sin(\alpha) - F_s \times (S_s \times \cos(\arcsin(h_s/S_s) + \alpha)) - F_e \times \cos(\alpha) \times a_e + F_{N_f} \times \cos(\alpha) \times a_{N_f}$$

$$0 = 2500 \times 0,5 \times \sin(11,3) - 800 \times 0,115 \times \cos(\arcsin(0,72/1,15) + 11,3) - 600 \times \cos(11,3) \times 0,89 + F_{N_f} \times \cos(11,3) \times 1,77$$

$$\Rightarrow 0 = 255 - 59 - 524 + F_{N_f} \times 1,74$$

$$F_{N_f} = 328/1,74 = 188,5N \quad (41)$$

$$F_{N_b} = F_l + F_e + F_s - F_{N_f} = 2500 + 600 + 800 - 188,5 = F_{N_b} = 3711,5N \quad (42)$$

Steg 2: Friksjon

Med 188,5N blir friksjonskraften på fronthjulet:

Fast dekke: $\mu = 0,4 - 1,0$:

$$F = \mu * 188,5N = 74,4N \Rightarrow 188,5N \quad (43)$$

Fast dekke (vått): $\mu = 0,05 - 0,9$:

$$F = \mu * 1855,75N = 9,425N \Rightarrow 169,65N \quad (44)$$

Is $\mu = 0,02$:

$$F = \mu * 1855,75N = 3,77N \quad (45)$$

Med 3711,5N fordelt på to bakhjul blir friksjonskraften på ett hjul:

Fast dekke (tørt) $\mu = 0,4 - 1,0$:

$$F = \mu \times 1855,75N = 742,3N \Rightarrow 1855,75N \quad (46)$$

Fast dekke (vått) $\mu = 0,05 - 0,9$:

$$F = \mu \times 1855,75N = 92,79N \Rightarrow 1670,18N \quad (47)$$

Is $\mu = 0,02$:

$$F = \mu \times 1855,75N = 37,12N \quad (48)$$

Steg 3: Fremdrift

Kreftene som fremdriften må overkomme:

$$(2500 + 800 + 600)N \times \sin(11,3^\circ) = 764,2N \quad (49)$$

764,2N er midt inne i tilgjengelige krefter for glatt underlag. Det betyr at det er gode muligheter for at dekket glipper og begynner å spinne. Hvis det blir brukt en differensial vil det være dobbelt så stor kraft tilgjengelig for fremdrift. Antispinn system kan også brukes for å sikre fremdrift selv ved grenseverdier for friksjonskraften og nødvendig fremdrift. Men antispinn vil ikke øke tilgjengelig kraft for fremdrift. Med enkle differensialer kan det oppstå et problem hvis ett hjul begynner å spinne da all kraft vil bli tilført hjulet som spinner. Dette kan problemet kan delvis løses av et antispinn system som stanser spinning.

Steg 4: Moment

Hjul med mindre radius vil kreve mindre moment fra drivverket, men vil ikke klare

å komme over hindringer som fortauskanter like lett som et større hjul. Hjul med radius på 30.5cm (24 tommer) som er ett middels stort hjul for sykler og standard for Musketier sykkel blir nødvendig moment:

$$M = 764,2N * 0,305m = 233,1Nm \quad (50)$$

For å ikke å kunne velge flere forskjellige leverandører for motoren regnes det med et maks moment fra motoren på 70Nm.

Med en motor med 70Nm må utvekslingen være:

$$\frac{233,1}{70} = 3,33 \quad (51)$$

Dette er minimum moment og utveksling for å holde sykkel på plass i en bakke, eller for å opprettholde farten sykkel allerede har. For å ha en akselerasjon og fremdrift må kraften til framdriften overgå kraften som holder sykkel tilbake, og alle tap som kommer av intern friksjon i drivverket (i lagre for eksempel). Interne tap i drivverket vil ikke tas med i denne oppgaven da det er for lite informasjon om mulige tap.

Akselerasjonen er gitt av:

$$a = \frac{F_{fremdrift} - F_{tyngde}}{m} \quad (52)$$

En akselerasjon på 1km/t per sekund krever en kraft og moment på:

$$F_{fremdrift} = \frac{3900 \text{ N s}^2}{9,81 \text{ m}} * \frac{1 \text{ m}}{3,6 \text{ s}^2} + 764,2N = 874,63N \quad (53)$$

$$M = 874,63N * 0,305m = 266,76Nm \quad (54)$$

Med en motor med 70Nm må utvekslingen være:

$$\frac{266,76Nm}{70Nm} = 3,81 \quad (55)$$

Steg 5: Fart

Maks fart må determineres med tanke på sikkerhet. Tyngden av lasten, tilgjengelig friksjon og bremseteknologi (for eksempel skivebrems med ABS) vil påvirke

bremselengden. Denne oppgaven skal ikke ta for seg problemstillinger med tanke på bremsesystemer så det vil ikke bli gjort noen forsøk på å regne ut bremselengder. Kunden har ingen spesielle krav når det kommer til fart. Et krav utenom sikkerhet som kan ha innflytelse på farten er at motoren skal ta seg av mesteparten av fremdriften, så maks hastighet for motor kan brukes. Motorer på elsykler skal ikke hjelpe fremdriften etter at sykkelen har nådd 25km/t[12].

Nødvendig utveksling for ønsket fart på $\frac{25}{3,6} = 6,94$ med $w = 1\frac{1}{s}$:

$$u_f = \frac{r_2}{r_1} = \frac{2 * \pi * r * w}{V_{\text{ønsket}}} = \frac{2 * \pi * 0,305 * 1\frac{1}{s}}{6,94} = 0,28 \quad (56)$$

Steg 6: Girspekter

Nødvendig girspekter vil være forholdet mellom nødvendig utveksling for moment (u_m) og nødvendig utveksling for fart (u_f):

$$\frac{u_m}{u_f} = \frac{3,81}{0,28} = 13,6 \quad (57)$$

Dette tilsvarer 1360% som er noe inget gir på markedet kan oppfylle.

Steg 7: Mulige løsninger

Siden det ikke eksisterer løsninger på markedet som har det nødvendige spekteret må det tenkes innovativt. Det regnes med at sykkelen har gir mellom krank og bakaksling som på Musketier sykkelen. Det regnes også med at det brukes en krankmotor med minimum 70Nm da vil være nødvendig å kunne øke dette momentet ved hjelp av et gir. For nødvendig utveksling med tanke på moment vil 3,81 brukes som et minimum. Utvekslingen kan ikke bli for høy med tanke på at det godt kan være bedre forhold på veiene enn det som ble regnet med når tilgjengelig friksjon ble beregnet. Ekstra tilgjengelig moment vil ikke bety at fremdriftskraften blir større enn nødvendig, den vil kun økes ved økt motkraft. Derfor vil det være optimalt med størst mulig tilgjengelig moment, men det kan ikke gå for mye utover farten. For utveksling med tanke på fart vil 0,28 være en veldig god verdi da dette er med en veldig behagelig tråkefrekvens for å kunne oppnå 25km/t. Det kan godt være at mange av brukerne er komfortable med å tråke litt raskere enn dette og at 25km/t er mer enn sikker og behagelig fart da det ikke er sett på løsninger for bremsesystemet. Det er godt mulig at en fart på så lavt som 15km/t er raskt nok med en tråkefrekvens på 1 runde per sekund. Dette gir en nødvendig utveksling på:

$$\frac{2 * \pi * 0,305 * 1}{4,17} = 0,46 \quad (58)$$

Så for å ikke begrense utviklingen mer enn nødvendig vil nødvendig girspekter settes fra:

$$\frac{3,81}{0,28} = 13,6 \quad (59)$$

til

$$\frac{3,81}{0,46} = 8,3 \quad (60)$$

Mer tilgjengelig fart vil være ønskelig men større girspekter vil trolig føre til utgifter og uønskede 'trade'-offs' som flere tannhjul, flere planetgir og større sprang mellom utvekslingene i giret. Utveksling for moment vil bli prioritert over utveksling for fart da fremkommelighet er viktigst.

Konsept 1:

Bruke eksisterende gir men endre størrelsen på tannhjulene som gir moment inn og ut av giret. Er det for eksempel en CVT eller et gir med interne planetgir mellom kranken og bakakslingen slik som på Musketier sykkel kan utvekslingen enkelt økes ved å bytte tannhjulet på inngangen til giret med et større tannhjul, eller ved å bytte det på utgangen med et mindre. Eller så kan tannhjulet på bakakslingen byttes til et større ett, eller det festet til pedalene til et mindre ett. Problemet med denne løsningen er at girspekteret er gitt av giret mellom pedalene og bakakslingen og denne løsningen flytter spekteret slik at momentet kommer på bekostning av fart. Om det blir brukt et Pinion gir med 1,82 som største utveksling på giret og 0,29 som laveste (628%) vil spekter med hjelp av en ekstra utveksling på 2,1 bli flyttet til 3,82 som høyeste og 0,61 som laveste. Dette vil gi en veldig lav fart med $w = 1\frac{1}{s}$:

$$V = \frac{2 * \pi * 0.305 * 1}{0,61} * 3,6 = 11,3 km/t \quad (61)$$

Profesjonelle og elitesyklister trækker i opptil 105 trakk per minutt[31]. De vil ikke klare å oppnå en fart høyere enn:

$$\frac{2 * \pi * 0,305 * \frac{105}{60}}{0,61} * 3,6 = 19,8 km/t \quad (62)$$

Konsept 2:

Med bremsesensorer er det tillatt at motoren fortsetter å kjøre i fem meter etter at syklisten har sluttet å trække. Dette kan utnyttes i korte partier ved at syklisten trækker til motoren starter og hviler mens sykkel fortsetter i fem meter før syklisten trenger å trække litt igjen. Dette kan gjøre at syklisten kan trække fort i kort tid for så å hvile i fem meter for å opprettholde en god fart på sykkel med mindre

krefter fra syklist. Ved bruk av store utvekslinger må syklisten trække veldig fort for å få sykkelen opp i fart før de kan la motoren ta over driften.

Konsept 3:

En girkasse med stort spekter og stor forskjell mellom girene vil gi tilstrekkelig moment og fart. Forskjellen mellom girene bør være slik at syklisten kan stille inn etter eget ønske om pedalmotstand, moment og fart. Et problem med stort girspekter er at det blir vanskelig å få til en forskjell mellom girene som gir tilstrekkelig liten endring da dette vil kreve mange gir. En løsning er å ha små endringer i utveksling for de girene med lavest utveksling med tanke på moment (lignende det som er på normale sykkelgir), og noen gir med store utvekslinger for ekstra med moment. Ved bruk av gir som gir stort moment vil sykkelen gå veldig tregt selv om syklisten trækker veldig fort, som kan være veldig frustrerende og slitsomt. Denne løsningen krever også at det blir utviklet et nytt gir da det ikke finnes noen gir på markedet som oppfyller disse kravene.

Konsept 4:

Om utvekslingen blir større enn 1,15 vil syklisten måtte trække raskere enn det som kan beregnes som slitsomt (60RPM) for å sykle raskere enn 6km/t. To av målene med denne oppgaven er å finne en løsning som gjør at syklisten ikke trenger å bruke mye energi og krefter og en løsning som vil gjøre leveringen mest mulig effektiv for å kunne konkurrere med andre løsninger som elbiler. Om syklisten ikke skal måtte trække veldig fort ved høy utveksling kan startassistansen brukes der syklisten vil slite med å opprettholde en fart på 6km/t. Men om motoren skal kjøre raskere enn det syklisten klarer å trække vil ikke syklisten gi noe moment så motoren må klare alt på egenhånd.

Det kan brukes vanlig oppsett for vare sykler med et vanlig sykkelgir mellom krank og bakaksling, pluss et assistansegir som slår inn sammen med startassistansen. Motoren står alene for framdriften i 6km/t. Elektronikken må omprogrammeres for å kjøre motoren i en mye høyere omdreiningshastighet når startassistansen brukes, og motoren må kunne gi høyt moment ved høy omdreiningshastighet. Om det vanlige sykkelgiret er automatisk vil dette kunne stille seg automatisk inn for høyt moment som vil kreve mindre utveksling av assistansegiret. Brukes for eksempel et Pinion gir med utveksling fra 1,82 til 0,29 trenger assistansegirets utveksling å være på 2,1, så kraftoverføringer mellom komponentene har utveksling på 1:1 (like størrelser på alle utvendige tannhjul). Når startassistansen ikke brukes vil Pinion giret kunne gi en utveksling på 0,29, som oppfyller kravet til girspekter.

4.6 Valg av konsepter for videre utvikling

Plassering av last gjør at normalkraften på fronthjulet vil gi liten friksjon til fremdrift. Derfor vil det ikke være stor hjelp med en motor i fronthjulet. Normalkreftene på bakhjulene kan gi tilstrekkelig friksjon for fremdrift, men fremdrift på bare ett hjul kan miste grepet på glatt underlag. Med fremdrift på begge bakhjulene blir kraften på hvert hjul halvparten av nødvendig kraft for fremdrift, og vil derfor ha mindre sannsynlighet for å begynne å spinne. Drift på begge bakhjulene krever en differensial for at sykkelen skal kunne svinge normalt. Enkle differensial kan få et problem om ett av hjulene spinner. Dette kan løses med bedre differensialer som har utstyr som slutter å tilføre kraft til hjulet som spinner, eller med antispinn system. Med drift på begge bakhjulene vil sannsynligheten for at hjulene begynner å spinne være mindre enn med ett hjul da fremdriftskraften deles på to og friksjonene trenger dermed å bare være halvparten så høy som ved drift på kun ett hjul. Et antispinn system krever ikke mer teknologi enn det som allerede er på sykkelen. Det er allerede en hastighetsmåler på hjulet og en styreenhet for motoren. Hastighetsmåleren kan plukke opp plutselig og voldsom akselerasjon og styreenheten kan programmeres til at dette skal stoppe motoren for så å starte den rolig på nytt.

En rotasjonssensor kan skape problematiske situasjoner der syklisten trenger hjelp av motoren for å starte sykkelens bevegelse. Startassistent kan løse dette problemet. Med momentsensor vil motoren begynne å hjelpe til selv om sykkelen står stille, og den nødvendige kraften fra syklisten for å få maksimal hjelp fra motoren kan stilles inn etter syklistens ønske. Momentsensor gjør det lettere å være fintfølede i situasjoner der det er viktig at syklisten har full kontroll over sykkelen.

Med rolig akselerasjon fra motoren vil ikke kreftene bli mye større enn nødvendig. Dette betyr at selv om det brukes gir som kan gi veldig høyt moment og mye kraft vil det ikke bli mer enn nødvendig for å ha ønsket akselerasjon (Newtons 2. lov). Visse hindringer som høye fortauskanter kan kreve mer moment enn en bratt bakke. Selv om det regnes med middels dårlig friksjonskraft for å finne ut hvor mye last som kan fraktes vil det ikke være dumt å ha mulighet for å utnytte den størst mulige friksjonskraften. Syklisten vil trolig bli kjent med hvordan sykkelen oppfører seg på ulikt føre og vil kunne kjenne igjen føre hvor det er mulig å utnytte det ekstra momentet.

Det er viktig at drivverket ikke blir laget for kun høyt moment, fart må også tas med i designet. Nåværende løsninger på markedet har ikke stort nok spekter for å kunne fungere i både bakker og på flat mark. Hvis sykkelen designes kun for å frakte

tung last opp bratte bakker vil den lave farten være et stort irritasjonsmoment for reiser på flat mark eller med lett last. For å opprettholde samme fart når det byttes til en utveksling med høyere moment må rotasjonshastigheten fra pedalene og/eller motoren økes. Mange gir på markedet oppgir ca. 500-600% forskjell fra laveste til høyeste gir [38][33]. Skal ønskelig moment for denne sykkelen oppnås bør girene på sykkelen ha en enda større spekter for å kunne ha nødvendig moment og tilstrekkelig fart. Det kan brukes flere løsninger sammen som f.eks. avhoppsgir gir på bakaksel og krank med et Pinion gir. Med dette vil gjøre designet og bruken komplisert.

For at syklisten ikke skal bruke veldig mange tråkk og lang tid for å sykle opp en bakke med et gir med høy utveksling (1,15 og over) kan startassistansen eller det faktum at motoren kan kjøre alene i fem sekunder etter at syklisten har sluttet å trække brukes. Fem sekunders drift uten pedalbruk krever sensorer som stopper motoren når bremsene blir brukt, men dette burde uansett være et krav på en sykkel hvor motoren gir mye moment til hjulene. Et problem med fem sekunders drift er at syklisten kan bli overrasket når motoren plutselig slutter og dermed miste mye av den oppnådde kinetiske energien om det ikke øyeblikkelig foretas nye tråkk. En type varsling til syklisten som for eksempel et lys kan forbedre syklisten på å måtte trække igjen. Det kan også oppstå farlige situasjoner der syklisten ikke er forberedt på at sykkelen fortsetter å kjøre etter at syklisten har sluttet å trække. Syklisten kan også miste grepet på styret og falle av sykkelen. Det at motoren fortsetter å kjøre kan gjøre en farlig situasjon enda mer alvorlig. Startassistansen vil på sin side kunne programmeres til å gi kraft så lenge syklisten holder inne en knapp eller lignende. Dette vil gi jevn drift og en forutsigbar oppførsel fra sykkelen. Startassistansen er dog restriktert til 6km/t mens fem sekunders solo kjøring av motoren vil holde samme hastighet som syklisten har oppnådd (opp til 25km/t). Problemet med dette er at motoren kommer til å trenge stor utveksling for moment som betyr at syklisten må trække veldig fort, en liten periode, for å oppnå hastigheter over 6km/t.

På flat asfalt vil en godt vedlikeholdt sykkel med godt smurte lagre, lite tap i koblinger og riktig lufttrykk i dekkene trenge mye mindre kraft for å bevege seg fremover enn det som trengs for å 'løfte' sykkelen opp bakker. Det vil være vanskeligere å akselerere på grunn av treghet (den egenskap ved enhver gjenstand at den vil motsette seg å bli satt i bevegelse eller å få hastigheten forandret[39]) desto tyngre lasten er, men akselerasjon er ikke en viktig egenskap for denne sykkelen. Det vil derfor trolig være tilstrekkelig med et vanlig gir sammen med motoren for sykkelen utenom bratte bakker og hindringer.

Ved å overlate den tyngste driften til kun motoren vil de tyngste partiene for syk-

listen elimineres. Men dette vil også kreve en mye større utveksling som følge av motorens effektbegrensninger. Dette fører igjen til et krav om større girspekter da sykkelen også må kunne fungere effektivt utenom partier med stort krav til moment.

For å samle og illustrere hvordan disse problemstillingen påvirker valget av konsept for videre utvikling er det laget en enkel matrise. Da det er en klar vinner er det ikke nødvendig å bruke vektlegging av behov eller mer nyanserte verdier.

	Sikkerhet	Moment	Fart	Kun motor	For alle	Sum
Konsept 1	0	1	-1	1	-1	1
Konsept 2	-1	1	1	-1	-1	-1
Konsept 3	0	1	0	-1	1	1
Konsept 4	1	1	1	1	1	5

Figur 47: Matrise for konseptvalg. Konsept 1: Flytte spekteret ved å bytte tannhjul. Konsept 2: Kjøre 5m uten å måtte trække. Konsept 3: Lage et gir med et veldig stort spekter. Konsept 4: Bruke startassistansen sammen med et eget assistansegir.

4.6.1 Konsept til neste fase

Videre i oppgaven vil det sees på forskjellige løsninger med å bruke startassistansen i samarbeid med høy utveksling for å oppnå høyt moment og tilstrekkelig fart for bratte bakker. Det vil fokuseres på funksjonalitet og kundens kjøreopplevelse, og hvordan motoren best kan utnyttes da pedaldrift kommer til å gå veldig langsomt. Med tanke på at syklisten vil slite med å holde følge med startassistansen allerede ved en utveksling på 1,15 vil noe av usikkerheten rundt hvor tung lasten kommer til å bli være neglisjerbar. Det vil garantert være et behov for minimum 1,15.

Assistansegiret kan lages på mange forskjellige måter. Det eneste som er bestemt er at det skal være en utveksling som er mye større en de andre. Om dette løses med en ekstra komponent som står fritt fra andre gir, eller om det skal lages et gir som har assistansegiret inkludert er ikke bestemt. Hvilken teknologi (CVT, avhopp o.l.) er heller ikke avklart.

Dette prosjektet har begrenset med tid så det velges bare et konsept for videre utvikling. Dette er ikke optimalt med tanke på set-based design, men siden det er et konsept som har vist seg som et mye bedre utgangspunkt enn andre og det er begrenset med ressurser velges det å bruke alt av gjenværende tid på dette konseptet.

5 Videre utvikling

Dette kapitlet bruker funnene og konseptene fra forrige kapittel og ser på forskjellige systemer og komponenter som kan brukes til å lage en startassistanse med et eget assistansegir. Hovedkonseptet vil i denne delen av oppgaven være assistansegiret. Denne delen vil til dels basere seg på fase 2 i Eppinger og Ulrich sin fremgangsmåte for produktutviklingsprosjekter vist i figur 2.1.1. Produktets 'arkitektur' vil være hovedprioriteten[5]. Dette betyr at type gir, plassering av gir, kraftoverføring og lignende blir prioritert over mer detaljert design som for eksempel definerte størrelser og valg av materiale. Før utviklingen går over til å se på detaljer må hovedfunksjonen være etablert.

Selv om produktets arkitektur kan virke veldig lovende sett på fra et helhetsperspektiv kan det oppstå problemer når designet sees på i detaljnivå, som kan føre til tapt tid og tapte ressurser[7]. Derfor vil det ofte være sikrere å ha alternativer. Det er også viktig å se på flere alternativer for å ikke gå glipp av viktige løsninger og såkalte 'gullkorn' ved å bli for opphengt i det første lovende designet, såkalt design fiksering[40]. Det vil bli foretatt en gjennomgang av komponenter og mulige løsninger for drivverket med fokus på hvordan de vil fungere sammen med hovedkonseptet. Utifra dette vil det forhåpentligvis være mulig å komme opp med gode konsepter på hvordan et drivverk med et assistansegir kan utformes.

5.1 Begrensninger

Videre i denne delen av oppgaven kommer det kun til å bli sett på forskjellige måter å utnytte startassistanse for å enkelt kjøre sykkelen i opptil 6km/t med et gir spesiallaget for å gi det momentet som er nødvendig i bratte bakker med tung last. Den eneste begrensningen til startassistanse er at sykkelen ikke kan gå raskere enn 6km/t, det er ingen begrensninger på hvor fort motoren kan gå eller på hvor mye kraft og moment startassistanse kan produsere[12]. Vanlig gangfart for en mann er 5,6km/t, så 6km/t vil trolig føles unaturlig på en sykkel på flat mark, men i bratte bakker vil det trolig være i nærheten av en normal hastighet for mange[41]. Motorer på elsykler kan hjelpe å drive sykler opp til 25km/t i Norge, så de er laget for å gå minst 4,17 ganger så fort som 6km/t. Det betyr at motoren garantert kan takle en utveksling på 4,17. Få motorer er designet med denne begrensningen implementert i motoren, så det regnes med at det ikke vil bli noen begrensninger med tanke på motorens maksimale rotasjonshastighet. På elsykler er det elektronikken

og fartsmålere som begrenser hastigheten, ikke selve motoren.

Om syklisten skal hjelpe til må de rotere kranken med en større vinkelhastighet enn det motoren gjør. Dette blir vanskelig når motoren roterer raskt nok til å kjøre sykkelen i 6km/t med høy utveksling (over 1,15). Men det vil muligens oppstå situasjoner der sykkelen skal kjøre veldig sakte som gjør det mulig for syklisten å hjelpe motoren ved å legge til ekstra moment. Hvis sykkelen blir stående fast mot en kant kan syklisten hjelpe til med å starte bevegelsen. Som forklart i kapittel 4.2.2 vil ofte den første bevegelsen være den tyngste. De største hindringene bør tas veldig rolig for å beskytte syklist og last mot støt. Med en krank på 175mm og en person på 70kg vil maksimalt moment fra syklist være 120Nm, som er mye mer enn hva de fleste motorer på markedet kan produsere. Det vil derfor ikke beregnes med behov for høye hindringer når det regnes ut hvilken utveksling som er nødvendig siden syklisten høyst trolig kan hjelpe til ved tilfeller der motoren stopper på grunn av manglende moment.

For å ikke låse valg av motor til en spesifikk leverandører brukes 70Nm som moment på motoren. Dette er et moment både Bosch, Bafang og Shimano kan levere [28][29][30]. I denne oppgaven regnes det med at det kjøpes inn en motor fra en leverandør som leverer krankmotorer med alt det nødvendige utstyret for å oppfylle norske lover.

Å kjøre motoren raskere enn det som er normalt vil ikke bryte noen lover. Det er hjulets omdreiningshastighet som må måles da det er sykkelens fart som begrenser hastigheten motoren kan kjøres. Det finnes mange forskjellige versjoner av hastighetssensorer, med det regnes med at det følger med hastighetssensor i motorsettet som blir kjøpt inn slik at det ikke blir en nødvendig problemstilling.

Det vil også vurderes forskjellige metoder for kraftoverføring, primert kjede eller aksling. Aksling mellom motor og bakaksling blir kalt kardangaksel eller bare kardang. Det regnes med at kraften skal overføres fra motor til gir og til slutt bakakslingen. Om det skal brukes differensial eller ikke er ikke viktig da de regnes med at kraftoverføringen til bakhjulet skjer ved hjelp av et tannhjul enter koblet direkte til bakakslingen eller til en differensial. Videre i oppgaven vil det kun refereres til bakakslingen, men det utelukker ikke at det kan være en differensial på bakakslingen.

5.2 Plassering av motor

Det eneste kravet til plassering av motoren er at den må plasseres før assistansegi-ret i drivverket. Krankmotor vil være det enkleste med tanke på tilgjengelig utstyr som kan kjøpes og brukes uten store modifikasjoner. Om det skal brukes en motor mellom kranken og bakakslingen kan det kjøpes inn en krankmotor eller navmotor som er beregnet for sykler med nødvendig ekstra utstyr (momentsensor, hastighetsmåler o.l.) og modifisere rammen og/eller motoren. Det vil høyst trolig fortsatt være mulig å bruke ekstraintstyret til motoren, som for eksempel hastighetsensor og bremsesensor, selv om motoren blir plassert et annet sted enn der den er designet for å monteres.

5.3 Styring av fart og akselerasjon

For vanlige elsykler er det kun en knapp som starter startassistansen som må holdes inne så lenge sykkelen skal kjøre ved hjelp av startassistansen[42]. Av sikkerhetsmessige grunner bør det ikke brukes av/på knapp da syklisten kan miste grepet, falle av sykkelen eller skru på startassistansen ved et uhell. Sykkelen bør stoppe automatisk når starteren slippes for å unngå uhell med skader på sykkel, materialer eller personer. Selv om 6km/t er en relativ lav hastighet vil det være en fordel å kunne kjøre roligere i visse situasjoner som på tett befolkede veier eller ved lukeparkering av sykkelen. Det vil også være ønskelig å kunne styre akselerasjonen etter værforhold, underlag og helning. Siden kraften mellom hjul og bakke er proporsjonal med akselerasjonen (Newtons 2. lov) vil det være optimalt å kunne stille den inn etter forhold.

Starteren bør plasseres et sted på sykkelstyret som gjør at syklisten fortsatt har godt grep på styret for stabilitet og kontroll. Alternativer kan være hendler, vrihåndtak eller knapp som er trykksensitiv. Syklisten må kunne holde hendelen/vrihåndtaket/knappen mens sykkelen kjører og samtidig være rask på bremsene. Syklisten må også kunne svinge uten at det påvirker hvordan syklisten holder starteren. Startere av startassistansen vil brukes av personer som kan være trøtte, ukonsentrerte, kalde og numne så det burde ikke være en for fintfølende kontroll.

Det kan inkluderes en eller annen form for mekanisme eller elektronikk som gjør det mindre sannsynlig at startassistansen skruses på ved et uhell. Man kan bruke en ekstra knapp som må holdes inne for at starteren kan benyttes. Ekstraknappen

kan enten kobles i serie med starteren eller inkluderes i programmet. Det er også mulig å bruke mekaniske metoder. Det kan brukes en tapp som hindrer bevegelse av knappen eller vrihåndtaket som må dyttes vekk med en finger for å starte. Etter at startassistansen er satt igang bør det ikke være nødvendig å fortsette å holde inne en ekstraknapp eller tapp for at syklisten skal kunne rette oppmerksomheten mot andre ting. Når knappen eller vrihåndtaket slippes må det returnere til startpunktet, startassistansen må stoppe og sikkerhetsmekanismen må slås inn igjen.

5.4 Type gir

Startassistansen vil trenge et gir som gir en mye høyere utveksling enn de andre girene. For utrente syklistere vil det allerede ved en utveksling på 1,15 kunne bli problemer med å sykle raskere enn 6km/t[31]. For tung last vil det være nødvendig med utvekslinger opp mot 4 (se 4.5). Startassistansen vil kun bruke motordrift som gjør det likegyldig om utvekslingen er 1,15 eller 4, så det regnes med at det ikke er behov for flere gir til startassistansen. Det holder med kun en utveksling på ca. 4 i tillegg til de andre utvekslingene som skal brukes utenom bratte bakker. Dette fører til at det vil være et stort sprang mellom utvekslingen til assistansegiret og den største utvekslingen til de resterende girene.

5.4.1 Avhoppsgir

Siden startassistansen skal bruke et gir som har mye høyere utveksling enn de andre girene vil det blir veldig komplisert å bruke avhoppsgir. Kjedet må hektes fra tannhjul til tannhjul på et avhoppsgir. Dette gjøres vanligvis ved å føre sykkelkjedet gjennom en skifter rett før tannhjulene som fører sykkelkjedet inn på ønsket tannhjul. Skifteren passer også på at kjedet alltid er stramt med en fjærbelastet mekanisme. Når gir skiftes vil skifteren dra kjedet til siden og kjedet vil 'hoppe' til det andre tannhjulet når kjedet blir ført inn på dette, og oppstrammeren vil passe på at kjedet er stramt. Hvis det er veldig stor forskjell på tannhjulenes størrelse må skifteren ha en innstilling som gjør at den flytter seg ekstra langt i forhold til de andre girbyttene. Oppstrammeren må være stram nok til å holde stramt for alle girene som vil gjøre den veldig stram for assistansegiret som er mye større enn neste gir. Om kjedet skal hoppe langt og strammeren er ekstra stram må kjedet være ekstra sikret for at det skal treffe riktig gir. Om skiftet til det sterkeste giret skal skje automatisk når startassistansen benyttes må det designes en helt ny

type mekanisme for girbytter. For at avhoppsgiret skal bytte gir må tannhjulene rotere som igjen betyr at sykkelen må være i bevegelse. Dette kan bli et problem med sykler som er tunge å starte hvis sykkelen har stoppet i et høyt gir med liten utveksling.

5.4.2 CVT - trinnløst gir

CVT gir kan ikke designes med et gir mye større enn de andre da giret er trinnløst. Om det skal designes et CVT gir med det nødvendige girspekteret vil trolig giret bli veldig stort da giret har alle mulige utvekslinger mellom første og siste gir. Dette vil bli unødvendig da giret startassistansen skal bruke trolig vil være langt tyngre enn det syklisten noen gang vil bruke sammen med pedaldrift, så utvekslingene imellom vil aldri bli brukt.

5.4.3 Planetgir

Med ett planetgir vil skiftet mellom direkte kraftoverføring som gir 1:1 utveksling og utveksling mellom solhjul og planethjulholder kunne skje direkte uansett hvilken forskjell det er på utvekslingene. Men de tre mulige utvekslingene som er mulig å oppnå med ett enkelt planetgir er ellers sterkt linket så det vil trolig bare være bruk for ett av dem. Å bruke planetgiret til å kun veksle mellom direkte kraftoverføring og en utveksling vil gjøre girbyttmekanismen relativt enkel. Ett enkelt planetgir kan brukes til å både øke momentet for en retning og som reversgir som snur retningen. Dette krevet dog en mer komplisert mekanisme for girbytter. Om det skal brukes planetgir for alle girene på sykkelen vil det kreve et veldig sammensatt system. Assistansegiret vil uansett kreve et ekstra planetgir i systemet som kan designes som en egen komponent i tillegg til en girkasse for de øvrige utvekslingene. Dette kan gjøre utviklingen enklere da det kun er nødvendig å designe et planetgir med en enkel girbyttmekanisme istedet for en helt ny girkasse med kompliserte systemer for å få flere utvekslinger. Med tanke på kostnader som kommer med utvikling og produksjon kan det bli mye billigere å kjøpe et girsystem for de øvrige girene, og fokusere utviklingen på et enkelt gir for startassistansen.

5.4.4 Tannhjul på akslinger

Med tannhjul på akslinger har ikke forskjellen i utvekslingene mellom girene noe å si for girbytter. Resten av girene må designes slik at den største utvekslingen får plass, men de andre girene må ikke ha noen annen sammenheng. Det vil være mulig å bruke grunnprinsippene til Pinion-, motorsykel- eller bilgir med spesialdesignede utvekslinger. Med tanke på motorsykel- og bilgir bør det vurderes enklere design for girbytter. Det fleste manuelle girkasser krever for eksempel en kløtsj og girstav som betjenes med en hånd og en fot, som vil bli vanskelig å få til på en sykkel med pedaler. Da det kun er å legge til et par ekstra tannhjul med veldig høy utveksling for girkasser med tannhjul på akslinger vil det være lettere å lage alle girene i en enkel enhet.

5.5 Automatisk eller manuelt gir

Når startassistansen brukes kan giret for assistansegiret tilkobles automatisk da motoren må være programert for å kjøre på dette giret. For å passe på at sykkelen oppnår men ikke overgår 6km/t med startassistansen kan motoren programmeres til å starte med et lavt turtall og jobbe seg oppover til sykkelen har oppnådd 6km/t. Automatisk innkobling av assistansegiret gjør at sykkelen kan begynne på et høyere turtall som vil spare tid for syklisten. Automatisk innkobling av assistentgiret krever ingen ekstra følere da det er styringen av startassistansen som skal gi beskjed om innkobling, men det vil kreve mer programmering.

Automatisk skifte av gir kan gjøres med hensyn til ønsket hastighet eller ønsket motstand på pedalene. Å ha en ønsket hastighet som styrer girbyttene gjør at syklisten kan velge om det skal tråkkes sakte og tung eller raskt og lett for samme hastighet. Om sykkelen er satt til å gå i en konstant hastighet må giret gire ned om syklisten trækker fort, og gire opp om syklisten trækker saktere. Det vil være hastighetssensoren på hjulet som styrer girbyttene.

Med ønsket motstand på pedalene vil hastigheten bli styrt av hvor fort syklisten trækker. Ved å øke motstanden økes hastigheten ved konstant omdreiningshastighet da det vil brukes høyere gir med utveksling for mer fart for å opprettholde motstanden.

Noen elsykler bruker momentsensorer på pedalene for å styre motorpådraget, og disse kan også brukes til å styre gir med tanke på ønsket motstand i pedaltrakk.

Alle elsykler er utstyrt med fartsmålere for å passe på at motoren ikke kjører over lovlig hastighet så det vil ikke kreve noen ekstra fartsmåler for å få til girbytter med tanke på ønsket hastighet for noen elsykler.

Det fleste manuelle sykkelgir bruker en vaier som strammes for å bytte gir etter hvor stram vaieren er. Noen nye gir bruker hydraulisk press for å bytte gir[**kindernay**]. Første gir vil høyst trolig være enten når vaieren/hydraulikken har størst kraft eller når den har minst. Om det vanlige giret skal være manuelt kan det installeres en komponent på vaieren/hydraulikken etter girskifteren som enten strammer opp maksimalt eller slipper opp all kraft. Dette kan gjøre på en rekke forskjellige måter og vil høyst trolig trenge et eget prosjekt for å finne optimal løsning. Elektroniske girbytter kan enkelt gjøres både automatiske og manuelle. For manuelle skifter på en elektronisk girbytter kan det benyttes en rekke forskjellige input, som for eksempel knapper eller potensiometre. Med helelektroniske girbytter vil det bli enkelt å programmere inn at startassistenten skal overstyre og bytte til giret med den høyeste utvekslingen.

5.6 Sikkerhet

Roterende deler med høyt moment kan utgjøre forskjellige faremoment, spesielt klemfare. Roterende akslinger og hjul kan være farlige om klær eller objekter hektes fast og blir dratt rundt. Hjul med eiker kan få kroppsdelar eller objekter mellom eikene. En sykkel med stor fremdriftskraft vil være farlig for personer som kan havne forran sykkelen uten evne til å stoppe den. Det er derfor veldig viktig at motoren stopper automatisk hvis startknappen slippes. Det burde også være sikring mot at startassistenten skrus på ved en feil. Roterende akslinger, gir og hjul med eiker burde enten være innkapslede eller ha en glatt overflate slik at kroppsdelar, klær eller andre objekter ikke kan sette seg fast og bli dratt rundt. Hjulene kan for eksempel bli utrustet med kapslinger over eikene lignende hjulkapsler på en bil.

5.7 Kjede eller kardang

Det vil være lett å finne deler om det brukes kjede da dette er den mest vanlige kraftoverføringen på sykler. Om det skal utvikles egne gir for sykkelen kan de enkelt kobles sammen med resten av sykkelen ved å bruke standard tannhjul som passer med kjedet. Ved bruk av kardang må rotasjonsretningen snus først ved pedalene og

så ved bakakslingen. Det finnes sykler hvor kardang blir brukt men delene fra disse syklenene er vanskeligere å modifisere til vareesykkelen enn kjeder og tannhjul.



Figur 48: Bafang motor og navgir med kardangdrift [43]

Kjeder er bygd opp av flere deler, og det er nok at det er feil i ett ledd for at kjedet skal bryte. Kjeder trenger jevnlig vask, smøring og oppstramming. Kardang og sammenkoblinger mellom kardang, pedaler, gir og differensial trenger mindre vedlikehold og kan innkapsles for beskyttelse. Når stort moment skal overføres kan det bli problemer med å få tak i kjeder som tåler påkjenningen av å bli brukt fem dager i uken i all slags vær. Kjeder under stor påkjenning trenger oppstramming og må byttes oftere enn en kardang. Tannhjul og lagre i en kardangkobling trenger jevnlig smøring eller oljeskift men ellers lite vedlikehold.

	Pluss	Minus
Kjede	Justerbar lengde Trenger mindre endringer Fungerer med alle girene	Mye vedlikehold Større sannsynlighet for feil
Kardang	Tåler stort moment Lite vedlikehold	Flere endringer

5.8 Motorkontroll

For styring av motor kan det originale programmet beholdes for normal drift. Startassistenten vil med et eget gir overstyre resten av programmet og kun styre motoren og giret. Det som må være med i startassistentprogrammet er kontroll over

motoren, tilkobling av assistansegir og input fra styring, bremsesensor og farts-sensor. Bortsett fra assistansegiret finnes allerede de andre komponentene på visse elsykler.

5.9 Konsept 1: Konstruer et eget gir som kun brukes i samarbeid med startassistansen

Det finnes allerede mange typer varesykler på markedet som fungerer fint under riktige forhold. Det er mulig å utnytte det som fungerer med disse og utfylle designet der det er mangler. Flere varesykler bruker gir mellom pedaler og bakaksel med to kjeder, fra pedaler til gir og fra gir til bakaksling. Et ekstra gir kan plasseres mellom eksisterende gir og bakakslingen uten store endringer på resten av designet.

Ett ekstra planetgir plassert ved bakakslingen kan gi ukompliserte girbytter for startassistansen som ikke påvirker resten av drivverket. Giret kan kobles direkte til bakakslingen med tannhjul mot tannhjul slik at det ikke blir noen ekstra kraftoverføring med kjede eller kardang som kompliserer systemet og fører til ekstra tap i overføringer. Om assistansegiret blir plassert lengst bak i kraftoverføringen vil ikke resten av overføringene måtte endres for å tåle mer moment.

Den totale utvekslingen mellom en krankmotor og bakakslingen vil være utvekslingen til assistansegiret ganger utvekslingen til det vanlige giret. Om det vanlige giret er styrt manuelt må syklist være klar over at det vanlige giret bør settes ned til første gir for mest mulig moment. Assistansegiret må ha veldig høy utveksling om det vanlige giret er stilt inn på høyeste gir. Brukes Pinion P1.18 som eksempel på vanlig gir vil høyeste gir ha en utveksling på 0,29 om tannhjulene som kjedet kobler sammen har lik størrelse[36]. Skal den totale utvekslingen være 4 vil assistansegiret måtte ha en utveksling på 13,8. Første gir vil med Pinion P1.18 gi en utveksling på 1,82 som betyr at hvis assistansegiret har en utveksling på 13,8 vil den totale utvekslingen bli 25,1 som er ekstremt stort[36]. Om assistansegiret dimensjoneres etter første gir trenger den en utveksling på kun 2,2.

For forutsigbar effekt fra startassistansen med tanke på moment, fart og aksele-rasjon bør startassistansen levere en konstant utveksling. Dette betyr at startas-sistansen må kunne kontrollere det vanlige giret i tillegg til assistansegiret. Med et automatisk gir som blir styrt av elektronikk kan starteren til startassistansen brukes til å fortelle elektronikken at den skal koble første gir på det vanlige giret. For vanlige gir som styres manuelt bør det installeres en komponent som kan bytte

til første gir når startassistenten brukes.

5.9.1 Girbytter på et enkelt planetgir

Når startassistenten ikke er koblet inn skal ikke giret ha noen utveksling, kraften skal kobles rett igjennom giret eller utenom. Når giret kobles inn skal kraften inn på solgiret og utifra planethjulholderen. Dette betyr at når giret er koblet inn må ringhjulet holdes fast og de andre delene rotere fritt, og når giret er utkoblet må ringhjulet rotere fritt og to av delene må kobles sammen (ringhjul og solhjul, ringhjul og planethjulholderen eller solhjul og planethjulholder).

Sammenkoblingene kan utføres på flere forskjellige måter. I atomatiske girkasser i biler blir det brukt clutch plater som vil gi en hurtig og trinnløs innkobling. En annen mulighet er å bruke splinter som kan gå inn i hakk eller hull. Byttene kan blir styrt av for eksempel elektromagneter, hydraulikk eller servoer.

5.10 Konsept 2: Girkasse med et bredt spektrum

En girkasse med innebygd ekstra gir for startassistenten vil gjøre designet av selve sykkelen enklere, men det må designes et helt nytt gir med stort spekter. Å kun ha en komponent istedet for to (vanlig gir og assistansegir) vil åpne for enklere endringer i designet med tanke på sykkelramme, antall hjul og kraftoverføringer.

Med en girkasse som inneholder alle girene kan assistansegiret være manuelt aktivert som de andre girene. Det bør da være elektronikk som registrerer når assistansegiret er aktivert slik at motorstyringen kan omstille rotasjonshastigheten til å passe med utvekslingen. Girkassen bør høyst trolig være helautomatisk om assistansegiret skal være automatisk for et mindre komplisert system. Girbyttmekanismen vil bli mindre komplisert med kun ett gir i forhold til to da kun trengs en girbyttmekanisme.

Girkassen må ha stor nok avstand mellom akslingene om det skal være plass til utvekslingen til assistansegiret. Dette betyr at det trolig må designes en ny innkapsling med plass til større tannhjul. Det kan være mulig å bruke akslingene fra et Pinion gir med den innebygde mekanismen for girbytter. Det er mulig å beholde tannhjulene på akslingen som har mekanismen for girbytter og kun bytte ut tannhjulene på den andre akslingen. Brukes ett oppsett likt det Pinion bruker i sine

girkasser med to innstillbare utvekslinger i serie må begge stilles inn på maks for å få maksimal utveksling.

Girbytter med synkronenheter vil kreve stor plass da det må være plass til synkronenheten mellom tannhjulene. Om det skal brukes like mange tannhjul som i et Pinion gir for å oppnå samme girspekter og forskjell mellom girene vil giret bli veldig stort. Dette vil bli problematisk hvis det skal brukes kjeder som kraftoverføring da akslingene må stå vinkelrett på kjedet.

5.11 Diskusjon

Konsept 1 og 2 har begge sterke sider som taler for dem. En girkasse med alle girene samelet i en enhet vil virke som en mer komplett løsning da det ikke vil være et behov for at det andre giret samarbeider med startassistenten for riktig utveksling. Men en girkasse med flere gir vil kreve større investeringer i utvikling og produksjon. Hvis det kun kreves et enkelt gir med en utveksling vil det være mye enklere å utvikle og produsere. Med kjededrift vil det også være relativt enkelt å plassere et ekstra gir en plass i drivverket. Den totale utvekslingen vil være avhengig av det vanlige giret, så et ekstra gir vil ikke gi en optimal helhet sammen med alle typer gir.

	Pluss	Minus
Konsept 1	Små investeringer Enklere design	Avhengig av andre komponenter
Konsept 2	Uavhengig av andre komponenter	Store investeringer i design

For videre utvikling vil tilgjengelige ressurser ha mye å si for hvilket konsept som blir valgt. Med ressurser menes antall personer involvert, hvilke ferdigheter gruppe-medlemmene innehar, hvor mye tid og utstyr som er tilgjengelig, og hvor mye penger utviklerne kan bruke. Med tanke på fordelene med set-based design burde begge konseptene sees nøyere på, men dette vil kreve mye ressurser. Hvis det ikke er nok ressurser til begge burde konsept 1 velges da dette vil kreve mindre å få til, spesielt hvis man konsentrerer prosjektet til kun å se på assistansegiret. For å kun vise at

en startassistanse som kjører sykkelen i 6km/t sammen med et gir med veldig høy utveksling er en løsning som er brukbar for vare sykler vil konsept 1 være det beste konseptet. Startassistanse konseptet trenger å bli bevist som en god hovedfunksjon før det utvikles videre, om det viser seg at dette ikke fungerer som tenkt burde utviklingen gå tilbake til de andre konseptene diskutert i kapittel 4.

Kjededrift vil gjøre det enklere å finne deler på markedet og å gjøre endringer på designet da kjeder kan omjusteres for forskjellige lengder. Å vurdere kardangdrift kan vente til siste del av utviklingen etter at alle de andre komponentene er på plass. For en vare sykkel som skal brukes ofte under fuktige og kalde forhold vil trolig kardang gi en mer sikker drift som krever mindre vedlikehold. Men funksjonen til kjede og kardang er helt lik med tanke på fremdriften så de ekstra investeringene som kreves av kardang bør bli spart til hovedkonseptet er godt utprøvd.

Som starter for startassistanse bør det være noe som er lett å kontrollere med tanke på å styre hastigheten, og syklisten bør ha godt grep på styret og god mulighet til å bruke bremsehendelen. Med en trykksensitiv knapp vil være vanskelig å være nøyaktig med pådraget, spesielt om det er ulendt underlag som rister sykkelen. Fingrene forran bør være ledige til å bruke bremsen. Tømmelen bør holde grepet på håndtaket. Et vrihåndtak som bare tar en del av håndtaket (lignende et sykkelgir med vribytter) vil gjøre det enkelt å holde kontrollen over pådraget, og holde alle fingrene ledige for å bruke bremsen og for å holde et godt grep. Konseptet er godt kjent for de fleste fra mopeder og motorsykler. Det kan i tillegg installeres en type utløsertapp som hindrer vrihåndtakets rotasjon om den ikke først dyttes bort. Når håndtaket slippes skal det automatisk returnere til startposisjon som vil skru av motoren, og utløsertappen skal smette på plass igjen.

Mekanismen for girbytter bør være elektronisk for å være kompatibel med alle typer design og modifiserbar etter kundens ønsker om hvordan girbyttene skal foretas. Hvis det kjøpes inn et gir for å fungere sammen med et assistansegir bør en løsning lignende Enviolos automatiske gir vurderes[44]. Men for å kun lage en løsning som beviser hovedkonseptet er ikke dette nødvendig. Siden de fleste girsystem bruker enten en vaier eller hydraulik er det enkelt å finne billige elektroniske metoder for å gjøre girbyttene elektronisk, som for eksempel en servo eller en elektrisk aktuator.

6 Konklusjon

For å lage en sykkel for transportavdelingen vil en startassistanse som kan kjøre sykkelen i 6 km/t med kun motordrift med et moment som kan takle selv de bratteste bakken kunne oppfylle de behov som kommer av tung last og bratte bakker. Det vil være andre ting som antispinn og differensial som kan gjøre drivverket enda bedre, men momentbehovet ligger i grunn for at sykkelen i det hele tatt skal kunne bevege seg.

Et enkelt assistansegir som kommer i tillegg til et vanlig sykkelgir vil være relativt enkelt å lage, og relativt enkelt å inkludere i drivverket. Både planetgir og gir med tannhjul på akslinger har mulighet for enkle girskift mellom to utvekslinger ved hjelp av elektrisk utstyr som elektriske magneter, aktuatorer, servoer eller lignende. Dette vil være nok til å teste konseptet under realistiske forhold. Hvis konseptet viser seg verdig kan utviklingen fortsette og det kan sees på en løsning med en girkasse med alle girene for sykkelen inkludert i samme komponent. Videre utvikling bør begynne med å se på konsept en fra kapittel fem, og så bevege seg over på konsept to hvis det første konseptet er en suksess.

Fremgangsmåten som ble etablert i kapittel 4 kan regne ut hvor stor utveksling som er nødvendig, hvilken motorløsning som kan brukes og om det er nødvendig med differensial eller antispinn. Denne kan brukes på alle typer sykler for å teste et design før det investeres i en prototype. Dette kan være et verdifullt verktøy for alle utviklere av sykler, men det må utføres fysiske tester av utregningene før fremgangsmåten kan ferdigstilles.

6.1 Videre arbeid

Konseptet med startassistanse og assistansegir har mange forskjellige muligheter når det kommer til valg av motorer, motorstyring, gir og kraftoverføringer. Det burde utføres flere tester for å sikre at det er det beste konseptet som blir valgt, spesielt med tanke på detalj-nivå design. En viktig del av denne prosessen vil være generering av fysiske prototyper. Motorer, gir og nesten alt annet utstyr kan kjøpes inn og prototypen vil være hvordan man kan få alle komponentene til å jobbe sammen. Det kan være at det må lages et eget gir for assistansegiret for å få de riktige utvekslingene for denne sykkelen.

Forhåpentligvis vil dette konseptet være interessant for en produsent, distributør eller bruker av varesykler som kan hjelpe videre arbeid med enda bedre innsikt i bruk av sykkel med tung last, og med muligheter for å låne sykler til testing. Det å ha en bestemt sykkel med en bestemt last vil gjøre det enklere å finne realistiske verdier for tilgjengelig kraft og nødvendig moment og utveksling. For videre utvikling er det viktig at utvikler er eller blir bedre kjent med forskjellige løsninger for elsykler som forskjellen ved bruk av rotasjonssensorer og momentsensorer.

Prototyper vil også være viktige for å teste hvordan utregningene i denne oppgaven svarer med virkeligheten. Utregningene i denne oppgaven har ikke tatt med tap som følge av friksjon i lagre og koblinger, og det vil være usikkert om motoren faktisk leverer det momentet produsenten har reklamert med når motoren kjøres med relativt stor rotasjonshastighet. Friksjon mellom bakke og hjul er avhengig av mange faktorer som type underlag (asfalt, brostein, snø, is o.l.), været (varmt, kaldt, fuktig) og ting som vil legge seg oppå underlaget (blader, sand, gjørme o.l.). Hvordan de forskjellige faktorene påvirker friksjonen kan bli et veldig godt tillegg i fremgangsmåten for designvalg. Fremgangsmåten for å finne mulig kraft for fremdrift og nødvendig moment på hjul med drift skal kunne gjelde for alle sykkelprosjekter så det vil være nødvendig å utføre flere tester under ulike omstendigheter som kan vise eventuelle mangler i ligningene.

Referanser

- [1] M. Thronsen. *Elektriske lastesykler inntar norske byer*. 2018. URL: <https://elbil.no/elektriske-lastesykler-inntar-norske-byer/> (sjekket 08.12.2018).
- [2] Det Kongelige Samferdselsdepartementet. “Nasjonal transportplan 2018–2029”. I: (2017), s. 9–233.
- [3] Trondheim kommune. *Sykelstrategi for Trondheim 2014-2025*. 2018. URL: <https://miljopakken.no/wp-content/uploads/2011/02/Sykelstrategi-for-Trondheim-2014-2025.pdf> (sjekket 08.12.2018).
- [4] R. Cooper. “Stage-Gate Systems: A New Tool for Managing New Products”. I: (1990).
- [5] S. D. Eppinger og K. T. Ulrich. “Product design and development, Fifth edition”. I: (2012).
- [6] H. Takeuchi og I. Nonaka. “The new new product development game”. I: (1986), s. 137–146.
- [7] B. Kennedy, D. Sobek II og M. Kennedy. “Reducing Rework by Applying Set-based Practices Early in the Systems Engineering Process”. I: (2014), s. 278–294.
- [8] Planview LeanKit. *What is set-based design*. 2018. URL: <https://leankit.com/learn/lean/what-is-set-based-design/> (sjekket 06.11.2018).
- [9] T. Purcell og J. Gero. “Design and other types of fixation”. I: (1996), s. 363–383.
- [10] S. P. Dow, K. Heddleston og S. R. Klemmer. “The Efficacy of Prototyping Under Time Constraints”. I: (2009).
- [11] Statens vegvesen. *Krav til sykkel*. 2018. URL: <https://www.vegvesen.no/trafikkinformasjon/syklist/krav-til-sykkelen> (sjekket 24.10.2018).
- [12] Statens vegvesen. *Elsykel*. 2018. URL: <https://www.vegvesen.no/kjoretøy/Eie+og+vedlikeholde/elkjoretøy/elsykel> (sjekket 24.02.2019).
- [13] J. Aabakken. *Den store elsykkelguiden*. 2018. URL: <https://www.forbrukerradet.no/guide/2015/den-store-elsykelguiden/> (sjekket 15.12.2018).
- [14] Statens vegvesen. *Tekniske krav til vanlig sykkel og elsykel*. 2018. URL: <https://www.vegvesen.no/trafikkinformasjon/syklist/krav-til-sykkelen/tekniske-krav> (sjekket 24.10.2018).
- [15] J. Kelly. *What is the Most Effective Way to Commutate a BLDC Motor?* 2016. URL: <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2017/feb/what-is-the-most-effective-way-to-commutate-a-blcdc-motor> (sjekket 08.06.2019).

- [16] PETE. “Understanding the Differences Between Direct Drive Geared Electric Bike Hub Motors”. I: (2013).
- [17] Bafang. *Drive systems*. 2019. URL: <https://www.bafang-e.com/oem-area/drive-systems/> (sjekket 23.05.2019).
- [18] Wikipedia. *Derailleur*. 2015. URL: <https://no.wikipedia.org/wiki/Derailleur> (sjekket 03.06.2019).
- [19] Store norske leksikon. *Planetgir*. 2018. URL: <https://snl.no/planetgir> (sjekket 30.04.2019).
- [20] S. Weinberg. *Planetary Gears – a masterclass for mechanical engineers*. 2018. URL: <https://www.engineeringclicks.com/planetary-gears/> (sjekket 30.04.2019).
- [21] C. Kriesi mfl. “Creating Dynamic Requirements Through Iteratively Prototyping Critical Functionalities”. I: (2016).
- [22] R. Mascitelli. *The lean product development guidebook: everything your design team needs to improve efficiency and slash time-to-market*. Technology Perspectives, 2007.
- [23] NTNU. *Campus*. 2019. URL: <https://www.ntnu.no/student/campusstudieprogram> (sjekket 13.05.2018).
- [24] Store Norske Leksikon. *differensial*. 2018. URL: <https://snl.no/differensial> (sjekket 16.12.2018).
- [25] C. B. *Higgins with differential*. 2010. URL: <https://pedal-trikes.blogspot.com/2010/09/higgins-with-differential.html> (sjekket 16.12.2018).
- [26] L. Chiou, S. Chebrolov og M. D. Zorzi. *Friction*. 2019. URL: <https://brilliant.org/wiki/friction/> (sjekket 28.05.2019).
- [27] Store norske leksikon. *Friksjon*. 2019. URL: <https://snl.no/friksjon> (sjekket 03.02.2019).
- [28] Bosch. *PERFORMANCE LINE CX*. 2019. URL: <https://www.bosch-ebike.com/en/products/performance-line-cx/> (sjekket 23.04.2019).
- [29] Bafang. *M500 DRIVE SYSTEM*. 2019. URL: https://www.bafang-e.com/products/?tx_bafangbase_bafangseries (sjekket 23.04.2019).
- [30] Shimano. *Product information E8000*. 2019. URL: <https://www.shimano-steps.com/e-bikes/europe/en/product-information/mtb/e8000> (sjekket 01.06.2019).
- [31] S. H. Simonsen. *Ikke tråkk så fort!* 2006. URL: <https://forskning.no/sport-partner-norges-idrettshogskole/ikke-trakk-sa-fort/1016098> (sjekket 21.05.2019).
- [32] J. Luke. *A complete guide to rear derailleurs*. 201. URL: <https://www.bikeradar.com/advice/buyers-guides/a-complete-guide-to-rear->

- derailleurs/?image=8&type=gallery&gallery=1&embedded_slideshow=1 (sjekket 10.06.2019).
- [33] Fallbrook technologies. *NuVinci® Technology*. 2018. URL: <https://www.fallbrooktech.com/nuvinci-technology> (sjekket 15.12.2018).
- [34] Store Norske Leksikon. *gir - tannhjulskonstruksjon*. 2018. URL: https://snl.no/gir_-_tannhjulskonstruksjon (sjekket 16.12.2018).
- [35] Learn Engineering. *Automatic Transmission, How it works ?* Youtube. 2016. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=Ugao6jTyM7k> (sjekket 06.06.2019).
- [36] Pinion. *Pinion*. 2019. URL: <https://pinion.eu/en/> (sjekket 26.05.2019).
- [37] EVO Sykler AS. *RADKUTSCHE MUSKETIER 15AH/540WH BATTERI*. 2018. URL: <https://evoelsykler.no/produkt/radkutsche-musketier-540wh/> (sjekket 13.12.2018).
- [38] Kindernay. *faq*. 2019. URL: <http://www.kindernay.com/faq/> (sjekket 31.05.2019).
- [39] Store norske leksikon. *Treghet*. 2011. URL: <https://snl.no/treghet> (sjekket 05.05.2019).
- [40] R. Youmans. “The effects of physical prototyping and group work on the reduction of design fixation”. I: (2010), s. 115–135.
- [41] Helsesvar. *Hva Er En Gjennomsnittlig Gangfart?* 2016. URL: <http://www.helsesvar.com/Military-Medicine/100903667.html> (sjekket 11.04.2019).
- [42] Bosch. *Kiox (FAQ)*. 2019. URL: <https://www.bosch-ebike.com/en/service/faq/how-do-i-activatedeactivate-the-walk-assistancestart-up-help/> (sjekket 02.06.2019).
- [43] Bafang. *MM G380.250*. 2019. URL: <https://www.bafang-e.com/oem-area/components/component/motor/mm-g380250/> (sjekket 23.05.2019).
- [44] Enviolo. *Why bother switching gears manually?* 2019. URL: <https://www.enviolo.com/en/automatic> (sjekket 07.06.2019).

