



CHALMERS



Design av en lätt, kraschvänlig och självkörande cykel

Kandidatarbete inom Elektroteknik

Johannes Angel
Oscar Bisseberg
Carl Görling
Gustav Hässel
Oskar Karlsson
Jacob Rehn

INSTITUTION

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2024
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE INOM ELEKTROTEKNIK

Design av en lätt, kraschvänlig och självkörande cykel

Johannes Angel
Oscar Bisseberg
Carl Görling
Gustav Hässel
Oskar Karlsson
Jacob Rehn



CHALMERS

Elektroteknik
Avdelningen för Systems and Control
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2024

Design av en lätt, kraschvänlig och självkörande cykel

Johannes Angel
Oscar Bisseberg
Carl Görling
Gustav Hässel
Oskar Karlsson
Jacob Rehn

© Johannes Angel, Oscar Bisseberg, Carl Görling,
Gustav Hässel, Oskar Karlsson, Jacob Rehn, 2024.

Handledare: Jonas Sjöberg, Full Professor, Systems and Control, Electrical Engineering, Chalmers tekniska högskola

Examinator: Nikolce Murgovski, Professor, Systems and Control, Electrical Engineering, Chalmers tekniska högskola

Kandidatarbete 2024
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Slutgiltig konstruktion under körtest

Typsatt i L^AT_EX
Göteborg 2024

Design av en lätt, kraschvänlig och självkörande cykel

Johannes Angel, Oscar Bisseberg, Carl Görling,
Gustav Hässel, Oskar Karlsson, Jacob Rehn

Elektroteknik
Avdelningen för Systems and Control
Chalmers Tekniska Högskola
Göteborg 2024

Abstract

This report presents the design process and construction of a plastic bicycle that is light, crash-worthy, and although not yet tested, likely capable of self-driving. The work is aimed at improving self-driving bikes used in testing autonomous safety systems for cars. The project is based on a previous non-self-driving plastic bike. One of the goals has been to identify weaknesses in the construction and improve them. This resulted in a new plastic bike, the majority of its body being 3D-printed, with two different forks: one made of carbon fiber and one 3D-printed in PETG. Additionally, the bike has the ability to switch between a 73° and 90° head angle. The weight has been reduced by 18,5% with the lightest combination of front-forks and head angle variants, thus decreasing the risk of damage during testing. The bike also demonstrated self-balancing capabilities when thrown, traveling distances of up to 70 meters. Two different detection tests were also performed to assess if the cars autonomous detection systems were able to identify the bike. The successful results suggest that the bike could be effectively utilized in tests evaluating autonomous crash avoidance systems. The next step would be to assess whether the bike can be self-driven using the existing control system. However, due to technical issues, this aspect could not be tested during the project.

Nyckelord: lätt, kraschvänlig, självkörande, cykel, huvudvinkel, framgaffel, oscillationer

Författarnas tack

Under projektets gång har flera personer varit till stor hjälp för oss. Vi vill därmed rikta ett stort tack till vår handledare Jonas Sjöberg för hans vägledning och hjälp under hela projektet.

Vi vill även tacka alla involverade i Autobike-projekten i “Bike-lab”. Samarbetet och utbytet av kunskap gjorde projektet både lättare och mer spännande.

Slutligen vill vi också tacka Erik Ronelöv på AstaZero och Carina Björnsson på Volvo Cars som välkomnade och hjälpte oss under och efter testdagen.

Akronymer

Nedan är listan över akronymer som har använts genom hela denna rapport listade i alfabetisk ordning:

CAD	Computer Aided Design
Chalmers	Chalmers tekniska högskola
E-modul	Elasticitetsmodul
PETG	Polyetentereftalat med glykol
PP	Polypropen
P-regulator	Proportional regulator

Innehåll

Akronymer	vii
Figurer	xiii
Tabeller	xvii
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Projekt mål	2
1.3 Bidrag	2
1.4 Cykelns parametrar	3
1.5 Tidigare arbeten och dess problem	4
1.5.1 Föregående plastcykel	4
1.5.2 Problemidentifiering	5
1.5.2.1 Deformation av framgaffeln	5
1.5.2.2 Avvikelse mellan hjulvinkel och styrvinkel	7
1.5.2.3 Justerbar huvudvinkel	8
1.5.2.4 Övriga svagheter med föregående konstruktion	8
1.6 Avgränsningar	9
2 Designprocess	11
2.1 Simulering	11
2.2 Materialval	14
2.2.1 Granta Edupack	14
2.3 3D-printing	15
2.4 Design av komponenter	16
2.4.1 Designaspekter	16
2.4.2 Framgaffel	18
2.4.3 Justerbar huvudvinkel	19
2.4.4 Cykelram	21
2.4.5 Sadel	21
2.4.6 Bottenmodul	22
2.4.7 Bakre infästningar	23
2.4.8 Fäste för styre	23
3 Konstruktion	25
3.1 Konstruktion	25

3.1.1	Framgaffel	25
3.1.2	Kronmodul	26
3.1.3	Sadel	28
3.1.4	Bottenmodul	29
3.1.5	Bakre infästningar	29
3.1.6	Styre	30
3.1.7	Övriga ändringar i konstruktion	30
3.2	Montering av cykel	31
4	Verifiering	33
4.1	Verifiering av konstruktion	33
4.1.1	Verifiering av deformation av framgaffel	33
4.1.2	Verifiering av avvikelse mellan hjulvinkel och styrvinkel	34
4.1.3	Verifiering av justerbar huvudvinkel	34
4.1.4	Verifiering av övriga svagheter med föregående design	35
4.1.4.1	Detektionstest 1	35
4.1.4.2	Detektionstest 2	36
4.1.5	Verifiering av självbalansering	37
5	Resultat	39
5.1	Konstruktion	39
5.1.1	Framtagen konstruktion med framgaffel i kolfiber	39
5.1.2	Framtagen konstruktion med framgaffel i PETG-plast	41
5.2	Justerbar huvudvinkel	43
5.3	Test av deformation i framgaffeln	44
5.4	Test av avvikelse mellan hjulvinkel och styrvinkel	44
5.5	Kör- och detektionstester	45
5.6	Designaspekter	48
5.6.1	Tjockare tvärsnitt på framgaffeln	48
5.6.2	Utvändiga infästningar	48
5.6.3	Dimensionerade infästningar efter rören	48
5.6.4	Verklighetsliknande komponenter	49
5.6.5	Runda av skarpa hörn och kanter	49
5.6.6	Minskad vikt på komponenter	52
5.6.7	Enkel montering och demontering	52
5.6.8	Möjliggöra enkel 3D-printning	52
5.6.9	Nya rör på cykeln	52
6	Slutsats och diskussion	53
6.1	Diskussion om konstruktion	53
6.1.1	Diskussion om materialval	53
6.1.2	Diskussion om designaspekter	53
6.2	Diskussion om tester	54
6.3	Eventuella förbättringar och vidarearbeten	55
6.4	Slutsats	57
	Litteraturförteckning	58

A	Appendix 1	III
A.1	Inköpta och återanvända delar	III
A.1.1	Kolfibergaffel	III
A.1.2	Styrlager	IV
A.1.3	Remhjul	V
A.1.4	Avloppsrör	VI
A.1.5	Slangklämmor	VII

Figurer

1.1	Cykeln följer en förbestämd väg som korsar bilens väg.	1
1.2	Illustration av cykelns parametrar.	3
1.3	Tidigare plastcykeln och dess komponenter numrerade.	4
1.4	Framgaffel utan pålagd belastning	6
1.5	Framgaffel efter pålagd belastning	6
1.6	Förenklad illustration hur hjulets vinkel skiljer sig från styrvinkeln.	7
1.7	Illustration över två olika huvudvinklar.	8
1.8	Sammankoppling mellan komponent och rör. Infästningen sker utvändigt på röret.	8
2.1	Blockschema för plastcykelns balansering	11
2.2	Simulering med föregående projekts cykel ($k = 90$)	13
2.3	Simulering av föregående cykel ($k = 900$)	14
2.4	Tabell över lämpliga material	15
2.5	CAD-modell av framgaffel i PETG-plast.	18
2.6	Framgaffel i kolfiber	18
2.7	Plastframgaffel delad	19
2.8	Plastframgaffel ihopsatt	19
2.9	CAD-modeller på första lösningen av justerbar huvudvinkel	19
2.10	Problem med första lösningen till justerbar huvudvinkel	20
2.11	Kronmodul med främre del till vänster, mittdel i mitten och bakre del till höger	20
2.12	Kronmodul med 90 graders bakre del.	21
2.13	Slutgiltig design av sadeln.	22
2.14	Slutgiltig design av bottenmodulen.	22
2.15	Slutgiltig design av bakre infästningar.	23
2.16	Slutgiltig design för fäste för styre	23
3.1	Ihopsatt plastframgaffel	25
3.2	Bakre och främre del i kronröret.	26
3.3	Bakre och främre del monterad med slangklämmor och aluminiumfäste för styrmotorn.	26
3.4	Mittenmodul som fäster framgaffel med kullager och remskiva	27
3.5	Infästning av remhjul på kolfiberframgaffel	27
3.6	Remhjul som pressar mot distans och styrlager.	27
3.7	Färdigmonterad kronmodul med 73° huvudvinkel.	28
3.8	Färdigmonterad kronmodul med 90° huvudvinkel.	28

3.9	Sadel sett framifrån från vänster	28
3.10	Sadel sett bakifrån från vänster	28
3.11	Bottenmodul sett framifrån från vänster	29
3.12	Bottenmodul sett bakifrån från vänster	29
3.13	Bakre infästningar	29
3.14	Styret	30
3.15	Infästningen på styret	30
3.16	Infästning innan montering	31
3.17	Infästning efter montering	31
4.1	Deformationstest	33
4.2	Illustration över testet för avvikelser mellan hjul och styrvinkel	34
4.3	Detektionstest 1	35
4.4	Detektionstest 2	36
4.5	Körtest	37
5.1	Cykel med framgaffel i kolfiber och huvudvinkel, $\lambda = 73^\circ$	39
5.2	Cykel med framgaffel i kolfiber och huvudvinkel, $\lambda = 90^\circ$	40
5.3	Cykel med framgaffel i PETG-plast och huvudvinkel, $\lambda = 73^\circ$	41
5.4	Cykel med framgaffel i PETG-plast och huvudvinkel, $\lambda = 90^\circ$	42
5.5	Till vänster: Modul för $\lambda = 90^\circ$. Till höger: Modul för $\lambda = 73^\circ$	43
5.6	Detektionstest 1: Radarvy	46
5.7	Detektionstest 1: Kameravy	46
5.8	Detektionstest 2: Radarvy	47
5.9	Detektionstest 2: Kameravy	47
5.10	Framtagen framgaffel	49
5.11	Föregående framgaffel	49
5.12	Framtaget kronrör	50
5.13	Föregående kronrör	50
5.14	Framtaget styre	50
5.15	Föregående styre	50
5.16	Framtagen sadel	51
5.17	Föregående sadel	51
5.18	Framtagen bottenmodul	51
5.19	Föregående bottenmodul	51
5.20	Framtagen bakre infästning	52
5.21	Föregående bakre infästning	52
6.1	Körtest A: Rak sträcka	55
6.2	Körtest B: Vänster sväng	56
6.3	Körtest C: Höger sväng	56
6.4	Körtest D: Figure-eight bana	56
6.5	Slutgiltig cykel med framgaffel i kolfiber och huvudvinkel, $\lambda = 73^\circ$	57
A.1	Inköpta kolfibergaffeln	III
A.2	Ritning styrlager	IV
A.3	Remhjul taget från föregående konstruktion	V

A.4	Inköpta avloppsrör från Biltema	VI
A.5	Slangklämmor från biltema	VII

Tabeller

1.1	Beskrivning av cykelns begrepp gällande dimensioner och dynamiska egenskaper.	3
2.1	Simuleringsparametrar	13
2.2	Beskrivning av designaspekter och dess mål med motiveringar	17
3.1	Förändringar utöver problembeskrivningen	30
5.1	Parametrar för cykeln med kolfiberframgaffel och 73° huvudvinkel	40
5.2	Parametrar för framgaffel i kolfiber och huvudvinkel, $\lambda = 90^\circ$	41
5.3	Parametrar för cykeln med framgaffel i PETG-plast och $\lambda = 73^\circ$	42
5.4	Parametrar för cykeln med framgaffel i PETG-plast och $\lambda = 90^\circ$	43
5.5	Resultat från deformationstester	44
5.6	Resultat från flexibilitetstester med 100 N pålagt	44
5.7	Testresultat från körttest med 73° huvudvinkel	45
5.8	Resultat komponenter enligt designaspekter	48
5.9	Vikt för varje komponent för den nya cykeln	52

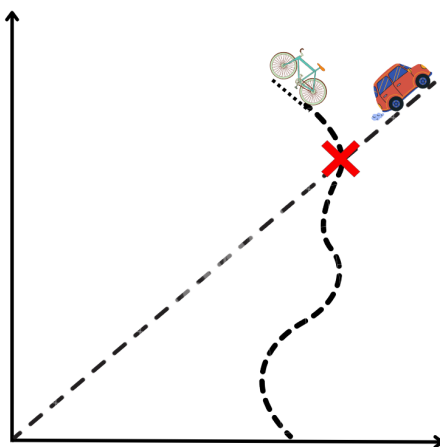
1

Inledning

1.1 Bakgrund

På Chalmers tekniska högskola drivs ett forskningsprojekt för att utveckla självstyrande cyklar som ska användas i testmiljöer där bilars krockundvikande system prövas. Bilindustrin strävar ständigt efter förbättringar och söker nya möjligheter att öka fordonens prestanda och konkurrenskraft. I den fortskridande utvecklingen är trafiksäkerhet en högt prioriterad fråga, där målet är att fordon ska kunna upptäcka och undvika olyckor autonomt.

Detta forskningsprojekt samarbetar ihop med Volvo Cars, Veoneer, Autoliv och AstaZero. Slutmålet är att förbättra bilarnas krockundvikande system genom att utveckla självkörande cyklar som kan användas i testmiljöerna på ett säkert sätt. Testerna genomförs genom att en förbestämd rutt bestäms för cykeln där både cykeln och bilen kommer att korsa varandras vägbanor, detta illustreras i figur 1.1. Fungerar det krockundvikande systemet så stannar bilen innan en kollision mellan fordonen inträffar. För att få fram ett fungerande krockundvikande system är det viktigt att testmiljön blir lik verkligheten. Därmed är det viktigt att cykeln ser ut och fungerar som en vanlig cykel. Cykeln ska vara självkörande och kommer styras med hjälp av en motor och ett styr- och reglersystem som har tagits fram av forskningsgruppen vid elektroteknik på Chalmers tekniska högskola.



Figur 1.1: Cykeln följer en förbestämd väg som korsar bilens väg.

Testet är inte riskfritt, då det krockundvikande system som existerar inte alltid fungerar vilket kan leda till att fordonen kolliderar. Om dessa kollisioner sker vid höga hastigheter så kan det leda till att cykeln förstörs och det sker stora materialskador på bilen. Därför behövs det konstrueras en cykel som är lätt och kraschvänlig för att reducera riskerna.

Cyklar har tagits fram i föregående iterationer av kandidatarbetet. Dessa cyklar ska analyseras i syfte att identifiera potentiella förbättringsområden för cykelkonstruktionen för att skapa en cykel i enlighet med dessa. Det här arbetet utförs parallellt med andra kandidatarbeten och forskningsgruppen på Chalmers under sektionen Systems and Control, som vidareutvecklar det befintliga kontroll- och reglersystemet för cykeln.

1.2 Projekt mål

Som nämnt i kapitel 1.1 är projektets mål att designa och konstruera en ”lätt och kraschvänlig” cykel som ska användas i Volvo Cars körtester för autonoma styr- och bromssystem. De målen som ska uppfyllas för att lösa projekt målet är.

1. Cykeln ska kunna självköras med hjälp av motor och ett befintligt reglersystem.
2. Minimera vikten för att minska materialskador på bilen vid kollision men även för att personen som kör bilen inte ska komma till skada.
3. Vid misslyckade körtester där cykeln kraschar ska det gå att ersätta skadade komponenter.
4. Det ska finnas reservdelar tillgängliga för att snabbt återställa cykeln om ett misslyckat körtest inträffar.

1.3 Bidrag

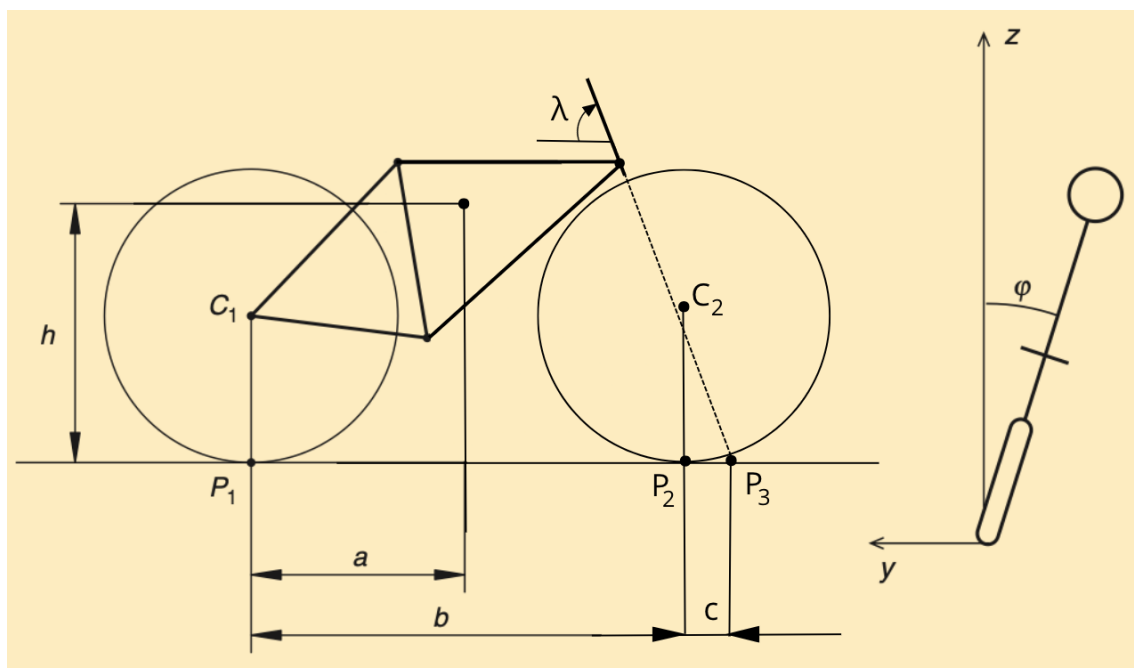
Bidraget efter utfört kandidatarbete är en förbättrad konstruktion av en plastcykel. Den nykonstruerade plastcykeln har konstruerats i enlighet med de projekt mål som presenterades i kapitel 1.2. Cykeln har konstruerats med 3D-printade komponenter samt standardkomponenter. En annan typ av plaströr har använts för sammansättning av komponenterna. Det har resulterat i en plastcykel med så låg vikt som gruppen fann möjlig, lättillgängliga och lättkonstruerade komponenter samt en cykel som kan självbalansera vid tillförd hastighet.

1.4 Cykelns parametrar

Cykelns begrepp gällande dimensioner och dynamiska egenskaper förklaras i tabell 1.1 och illustreras i figur 1.2.

Tabell 1.1: Beskrivning av cykelns begrepp gällande dimensioner och dynamiska egenskaper.

Beskrivning	Symbol	Enhet
Rullvinkel	φ	rad
Styrvinkel	δ	rad
Massa	m	kg
Huvudvinkel	λ	°
Höjd för massans centrum	h	m
Avstånd till massans centrum fr. bakhjulets centrum	a	m
Hjulbas	b	m
Trail	c	m



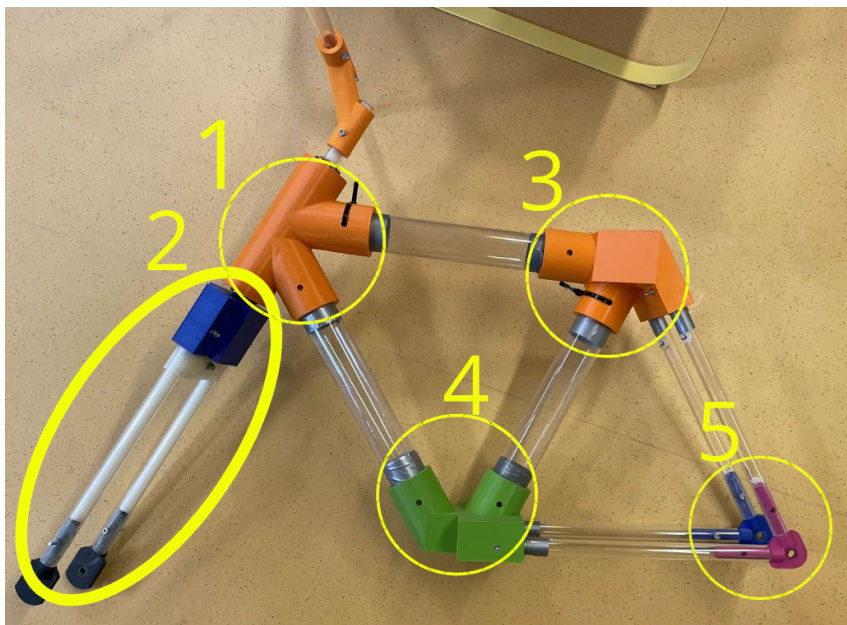
Figur 1.2: Illustration av cykelns parametrar.

1.5 Tidigare arbeten och dess problem

Flera iterationer av projektet med mål att skapa och förbättra en självkörande cykel för körtester har genomförts. I detta kapitel förklaras den föregående iterationen av cykeln och dess problem.

1.5.1 Föregående plastcykel

Under 2023 utvecklades den föregående versionen av plastcykeln, denna presenteras i figur 1.3. Den tidigare plastcykeln med tillhörande styr- och reglersystem uppvisade stabilitet för självbalansering vid simulation, men självbalanseringen lyckades inte vid provkörning (Alzein m.fl, 2023). Plastcykeln är uppbyggd av inköpta standardkomponenter samt 3D-utskrivna komponenter. Cykeln har en vikt utan hjul på 4.80 kg och har en huvudvinkel på 56°. Komponenterna visas i figur 1.3 och dess benämningar samt funktioner förklaras i listan under figuren.



Figur 1.3: Tidigare plastcykeln och dess komponenter numrerade.

1. **Kronrör:**
Sammankopplar framgaffel med ramen.
2. **Framgaffel:**
Sammankopplar hjulet med kronrör.
3. **Sadel:**
Sammankopplar ramen med kronröret, bottenmodulen och bakre infästningarna.
4. **Bottenmodul:**
Sammankopplar ramen med kronröret, sadeln och bakre infästningarna.
5. **Bakre infästningar:**
Sammankopplar ramen med bakhjulen samt fäster hjulet.

Cykelram:

Cykelramen utgörs av två olika sorters rör i PP-plast i olika dimensioner som sammankopplar komponenterna. De tjocka rören är 60 mm i diameter kopplar samman komponenterna 1 & 3, 1 & 4 och 3 & 4. De tunna rören är 25 mm i diameter och sammankopplar komponenterna 3 & 5 och 4 & 5.

1.5.2 Problemidentifiering

I detta delkapitel presenteras de identifierade svagheter, potentiella förbättringsområdena samt förslag på förändringar utifrån det tidigare kandidatarbetet.

1.5.2.1 Deformation av framgaffeln

Det primära problemet som bidrog till att den tidigare plastcykeln inte kunde självköra är framgaffeln. Framgaffeln är inte tillräckligt styv och beskrivs som ett återkommande problem i det föregående projektet (Alzein m.fl., 2023). Denna bestod av tunnväggiga cirkulära plaströr med inbyggda nylonpinnar. Plaströren hade en för låg styvhet vilket medförde deformation i framgaffeln vid körning av cykeln.

Bristen på styvhet i framgaffeln medför en begränsning att kunna absorbera uppkommande vertikala krafter vid körning av cykeln, detta visas i figur 1.4 och 1.5. Vid de vertikala krafterna kan framgaffeln anses vara en balk i böjning med en fast inspänning. Därmed kan den vertikala förskjutningen räknas ut med hjälp av ekvation 1.1 (Sundström, 2020). Där F är kraften som appliceras på framgaffeln, L är längden på framgaffeln, E är elasticitetsmodulen, I är yttröghetsmomenten och δ_{flex} är deformationen på framgaffeln.

$$\delta_{flex} = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (1.1)$$

Föregående konstruktions framgaffel, med och utan pålagd belastning, visas i figur 1.4 och 1.5. I figur 1.5 visas framgaffeln med en överdimensionerad pålagd belastning för att visualisera deformationen som uppstår som ett resultat av saknad styvhet.



Figur 1.4: Framgaffel utan pålagd belastning



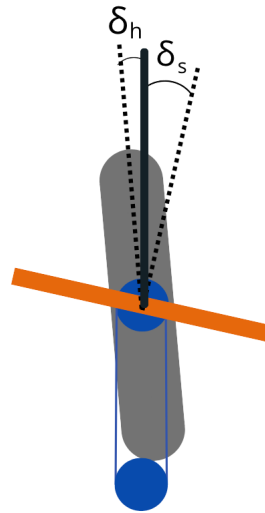
Figur 1.5: Framgaffel efter pålagd belastning

Från ekvation 1.1 ges att material med högre elasticitetsmodul kan absorbera krafter bättre, vilket minskar deformationen. Detta är önskvärt då deformationen inducerar störningar i reglersystemet som vidare skapar instabilitet för cykelns självbalansering och självstyrning. Ekvationen ger också att en längre framgaffel deformeras mer än en kortare. Den tidigare framgaffeln är designad längre än en vanlig framgaffel, detta gör att mindre kraft krävs för att den ska deformeras.

Till sist påverkar även tvärsnittet på framgaffeln yttröghetsmomentet vilket i sin tur påverkar styvheten. Yttröghetsmomentet ges av $I = \frac{\pi r^4}{4}$ (Sundström, 2020) och från ekvation 1.1 ges att ett större tvärsnitt har bättre förmåga att motstå deformationer.

1.5.2.2 Avvikelse mellan hjulvinkel och styrvinkel

Ett annat identifierat problem med framgaffeln är att hjulvinkeln inte följer styrvinkeln vid körning. Kraftmomentet från styret förs inte över ner till hjulet, vilket medför en försening på hjulets respons vid ändrad styrvinkel, detta ger olika vinklar på styrvinkeln och hjulvinkeln. Detta visas i figur 1.6 där hjulet är i grått, styret i orange och motorn som bestämmer styrvinkeln δ_s i blått.



Figur 1.6: Förenklad illustration hur hjulets vinkel skiljer sig från styrvinkeln.

När hjulvinkeln avviker från styrvinkeln börjar framgaffeln att oscillera horisontellt. Framgaffeln kan i detta fall anses bete sig som en torsionsfjäder (Alzein m.fl., 2023).

$$I \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + k \cdot \theta = M \Rightarrow I \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{E \cdot A}{L} \cdot \theta = M \quad (1.2)$$

Där de olika termerna är:

- I , framgaffelns tröghetsmoment [$kg \cdot m^2$]
- k , fjäderkonstanten [$\frac{Nm}{rad}$]
- θ , vinkelskillnaden mellan styre och hjul $\delta_s - \delta_h$ [rad]
- M , vridmomentet [Nm]
- E , E-modulen [N/m^2]
- A , framgaffelns tvärsnittarea [m^2]
- L , framgaffelns längd [m]

Vid analys av ekvation 1.2 går det att dra slutsatser om förbättringsåtgärder. Vid ökning av framgaffelns yttröghetsmoment, minskning av längden på framgaffeln, ökning av tvärsnittsarean eller E-modulen i materialet så kommer det resultera att framgaffeln blir mindre benägen att deformeras av det externa vridmomentet M .

1.5.2.3 Justerbar huvudvinkel

Huvudvinkeln, λ , kommer påverka kraftfördelningen av de uppkommande krafterna på den främre axeln. Det är därför av intresse att undersöka hur huvudvinkelns storlek påverkar uppkomsten av oscillationer och deformation i framgaffeln och regleringen av det självbalanserande och självkörande systemet. Föregående konstruktion tillåter inte justering av huvudvinkeln och således krävs olika konstruktioner för att kunna jämföra olika huvudvinklar, som visas i figur 1.7. Därför är det relevant att undersöka om det är möjligt att justera huvudvinkeln utan att skifta mellan olika cyklar.

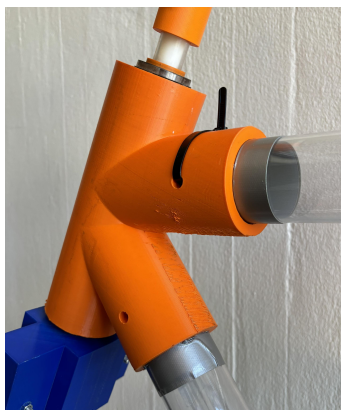


Figur 1.7: Illustration över två olika huvudvinklar.

1.5.2.4 Övriga svagheter med föregående konstruktion

Dålig montering av komponenter

Komponenterna som används på den föregående cykeln ansluter utvändigt på rören, vilket tydliggörs i figur 1.8. Dimensionerna mellan rören och komponenterna överensstämmer inte och orsakar därmed glapp. Glappet uppmättes till 3-12 mm beroende på vilken komponent som undersöktes (Alzein m.fl., 2023). Glappet medför ett svårmodellerat beteende vid små rörelser som kräver precision. Det kan medföra en fördröjd respons vilket gör att systemet blir instabilt. Det är därmed av intresse att förbättra eller ändra konstruktionen för att reducera glappet mellan komponenterna.



Figur 1.8: Sammankoppling mellan komponent och rör. Infästningen sker utvändigt på röret.

Stora och kantiga komponenter

Genom att fästa komponenten utvändigt på rören ökar komponentens storlek som därmed ökar vikten. Detta är något som inte är eftertraktat när man ska reducera skaderisken vid eventuella kollisioner vid körtester, se projektmål 2 i kapitel 1.2. Ett flertal av föregående cykelns komponenter är stora och har vassa kanter. Det här gäller kronrör, sadel och bottenmodulen som alla visas i figur 1.3. Detta är icke önskvärt ur ett hållfasthetsperspektiv då spänningarna i materialet ökar vid vassa kanter (Neuber, 2023).

Liknar inte en cykel

Föregående cykel är inte cykellik. Det är viktigt att cykeln ska se ut som en vanlig cykel för att sensorerna på bilen ska uppfatta cykeln under körtesterna.

1.6 Avgränsningar

Följande avgränsningar sätts på projektet:

- Vid testkörning av cykeln utomhus så kommer tillfällena att begränsas till goda väderförhållanden utan nederbörd och torr asfalt.
- Elektroniken som gör cykeln självkörande beaktas inte.
- Algoritmen som styr cykeln beaktas inte.

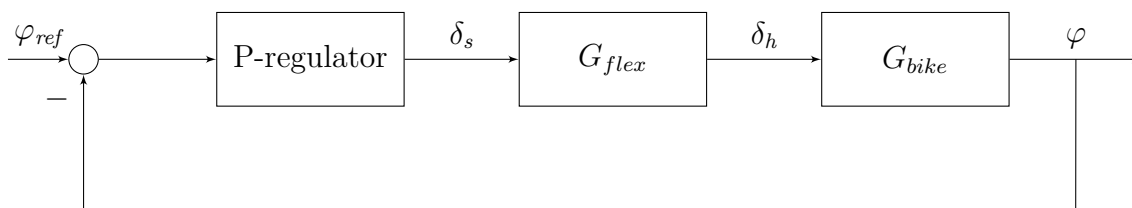
2

Designprocess

Det här kapitlet beskriver designprocessen som använts för att uppnå de mål som är presenterade i kapitel 1.2. Svagheter i komponenterna i den föregående plastcykeln har identifierats, därefter har nya koncept tagits fram. Med de tidigare svagheter, tillsammans med simuleringar och materialval, har en lista med designaspekter tagits fram för att säkerställa att de nya komponenterna uppfyller projektmålen.

2.1 Simulering

Innan cykeln började konstrueras så gjordes en simulering för den tidigare cykeln och dess dynamik för att säkerställa att en högre E-modul förbättrar självbalanseringen. Cykeln modellerades efter en redan framtagen överföringsfunktion för en styv cykel i stål. Då cykeln i föregående projekt var gjord av plast introducerades en flexibilitet som, till skillnad från en cykel i stål, gjorde att vridmomentet från styret inte fullständigt överfördes till hjulet. För att kompensera för detta krävs en överföringsfunktion med avseende på framgaffelns flexibilitet. Då endast cykelns balansering var aktuellt att simulera togs ett blockschema fram som illustreras i figur 2.1.



Figur 2.1: Blockschema för plastcykelns balansering

En cykels överföringsfunktion kan uttryckas som förhållandet mellan cykelns lutningsvinkel φ och hjulvinkel δ_h (Åström, Klein, Lennartson 2005). Detta visas i ekvation 2.1:

$$\frac{\varphi}{\delta_h} = G_{bike}(s) \quad (2.1)$$

Med antagandet om en konstant hastighet v kan följande överföringsfunktion tas fram, visas i ekvation 2.2:

$$G_{bike}(s) = \frac{av}{bh} \frac{s + \frac{v}{a}}{s^2 - \frac{g}{h}} \quad (2.2)$$

För att ta fram överföringsfunktionen för flexibiliteten antogs att cykelns framgaffel kan anses som en torsionsfjäder, vilket innebär att vridmomentet för framgaffeln kan skrivas som visat i ekvation 2.3:

$$\tau_{gaffel} = k\theta + d\dot{\theta} + I\ddot{\theta} \quad (2.3)$$

Där de olika termerna är:

- k , fjäderkonstanten [$\frac{Nm}{rad}$]
- θ , vinkelskillnaden $\delta_s - \delta_h$ [rad]
- d , dämpningskonstanten [$\frac{Nm}{s*rad}$]
- I , framgaffelns tröghetsmoment [$kg * m^2$]

Tröghetsmomentet för framhjulet J på framgaffeln uttrycks som:

$$\tau_{gaffel} = J\ddot{\theta} \quad (2.4)$$

Antagandet att framgaffelns tröghetsmoment I är försumbart i förhållande med framhjulets tröghetsmoment runt styraxeln J ger att:

$$J\dot{\omega} = k\theta + d\dot{\theta} \quad (2.5)$$

Vilket ger:

$$J\dot{\omega} = k(\delta_s - \delta_h) + d(\dot{\delta}_s - \dot{\delta}_h) \quad (2.6)$$

$$J\ddot{\delta}_h = k\delta_s + d\dot{\delta}_s - k\delta_h - d\dot{\delta}_h \quad (2.7)$$

Med hjälp av Laplacetransformering och begynnelsevillkoret $\delta_s = \delta_h = 0$ fås:

$$Js^2\delta_h(s) = k\delta_s(s) + ds\delta_s(s) - k\delta_h(s) - ds\delta_h(s) \quad (2.8)$$

Vilket leder till överföringsfunktionen mellan styrvinkeln och hjulvinkeln:

$$G_{flex}(s) = \frac{\delta_h}{\delta_s} = \frac{ds + k}{Js^2 + ds + k} \quad (2.9)$$

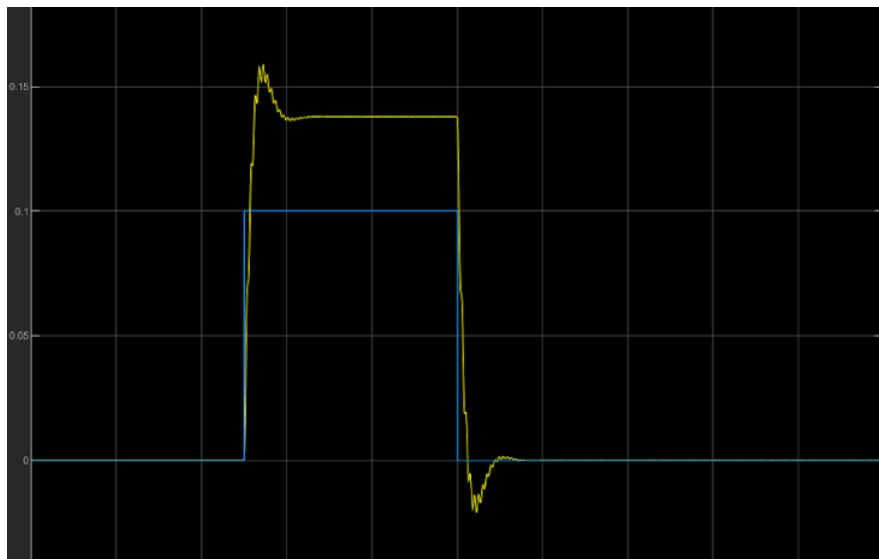
Detta leder till att $G_{flex}(s)$ har tre okända parametrar, tröghetsmomentet för framhjulet runt styraxeln J , dämpningskonstanten d och fjäderkonstanten k som efter experiment av Alzein m.fl. (2023) gav $J = 0,0213$, $d = 0,3$, och $k = 90$.

Med hjälp utav blockschemat visat i figur 2.1 simulerades cykeln i Matlab för att se hur väl den kunde stabilisera sig från en stegsignal. Parametrarna som användes för att simulera cykeln visas i tabell 2.1:

Tabell 2.1: Simuleringsparametrar

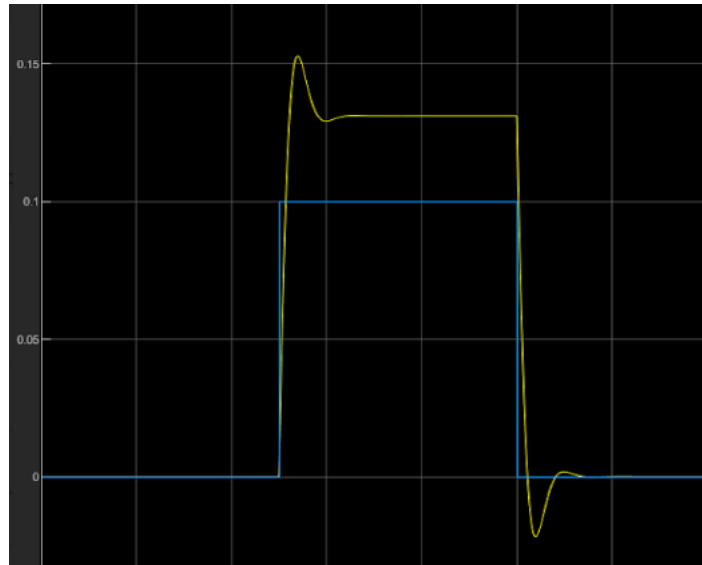
Parameter	Värde
m [kg]	31,3
a [m]	0,46
b [m]	1,185
h [m]	0,66
v [m/s]	3
g [m/s ²]	9,82
J [kg · m ²]	0,0213
d [$\frac{Nm}{s \cdot rad}$]	0,3
k [$\frac{Nm}{rad}$]	90
K_p [konstant]	3

Resultatet av simuleringen visas i figur 2.2.



Figur 2.2: Simulering med föregående projekts cykel ($k = 90$)

Cykeln svarade väl med ett visst kvarstående fel vid svängning men stabiliserade sig snabbt när insignalen gick tillbaka till 0. En viss oscillering noterades också och då en större E-modul konstaterats vara bättre för att stå emot oscillationerna, som nämnt i kapitel 1.5.2.2, valdes det att testa ett större k för den föregående cykeln då k blir större vid en större E-modul. Samma parametrar för föregående projekts cykel förutom k användes för att se vilken påverkan det hade för cykelns självbalansering. För att se hur väl cykeln svarade användes en stegsignal, se figur 2.3.



Figur 2.3: Simulering av föregående cykel ($k = 900$)

Då det nya konceptet gav en mindre oscillerande utsignal valdes det att gå vidare med en framgaffel i styvare material. Detta resultat överrensstämmer med det som presenterats i tidigare i kapitel 1.5.2.1 och 1.5.2.2. Resultatet från simuleringen samt tidigare presenterade hypoteser om att cykeln skulle självbalansera bättre med en framgaffel i styvare material ligger till grund för materivalvalet.

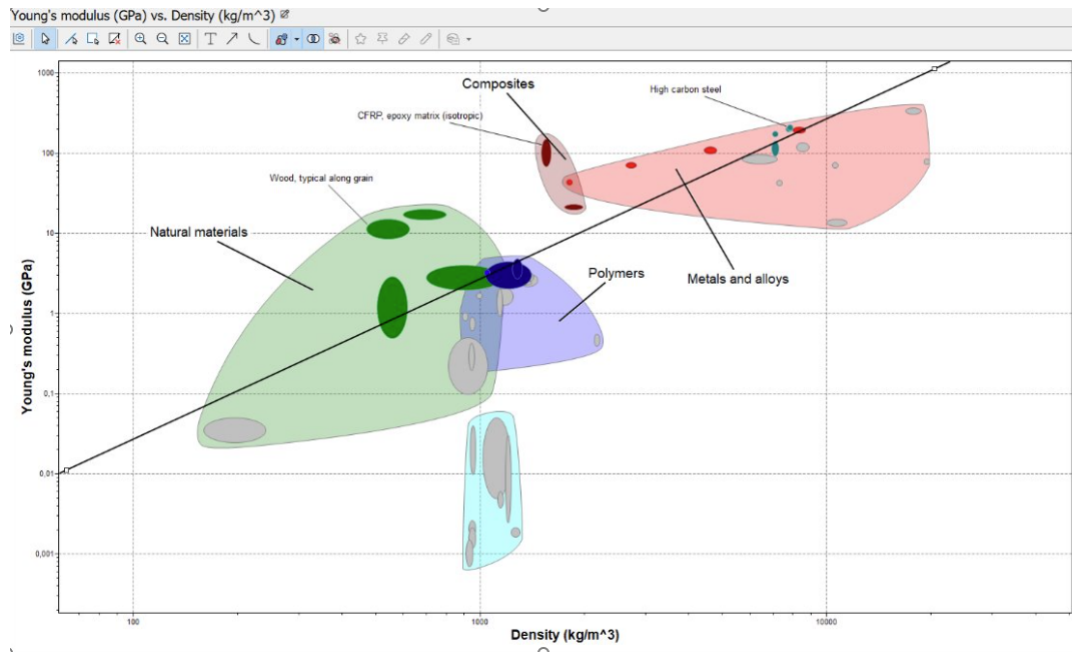
2.2 Materialval

Utifrån simuleringen i kapitel 2.1 undersöktes vilka material som är lämpliga att använda i framgaffeln för att öka styvheten men samtidigt behålla en låg vikt.

2.2.1 Granta Edupack

För att få fram relevanta material användes programmet Granta Edupack som är ett materialbibliotek där man utifrån parametrar och önskade egenskaper får fram material som besitter dessa egenskaper. I programmet sätts densiteten som x-axel och E-modulen som y-axel. Efter detta väljs materialindex som är en linje som visar de material som bäst uppnår kriterierna. Lutningen på indexet väljes med hjälp av vilket lastfall som gaffeln utsätts för, detta beskrivs i avsnitt 1.5.2.1, se figur 2.4.

I grafen ses de materialgrupper som finns i databasen presenterade som ovaler av olika färger. De material som är mest lämpliga att använda utefter kriterierna är de material som ligger över den linjära linjen i materialindexet.



Figur 2.4: Tabell över lämpliga material

- PETG-plast väljs eftersom att materialet har låg densitet och tillräckligt god styvhet. Materialet är lättillgängligt då PETG-plast finns tillgängligt i Chalmers 3D-skrivare.
- Kolfiber väljs eftersom att detta är ett material med väldigt goda egenskaper gällande styvhet och densitet. Det är styvt och har låg densitet vilket syns i figur 2.4.

2.3 3D-printing

3D-printning är den valda metoden för framställning av komponenterna. Denna metod möjliggör snabb tillverkning och bidrar med hög flexibilitet i processen. Vid eventuella felberäkningar eller vid behov av reservdelar kan nya delar snabbt printas ut, i enlighet med projektmål 3 i kapitel 1.2.

Vid utskrivning av delar används skrivarna Prusa MK4, Prusa MK3S samt Creality CR-10 S5. Olika skrivare kommer att användas beroende på delens storlek. Creality CR-10 S5 är den största skrivaren som används och har kapacitet att skriva ut delar med mått upp till 500x500x500 mm, till skillnad från Prusa MK4 & MK3S som har kapacitet upp till 250x210x210 mm. Samtliga skrivare har lagerupplösning på 0,15-0,3 mm vid användning av 0,4 mm munstycke.

Vid tillverkning av delar med små toleranser kommer flera iterationer av dessa delar konstrueras och printas. Detta eftersom toleranserna i 3D-printerna inte är lätta att säkerställa. Det är då fördelaktigt att ta fram flera varianter för att få fram det bästa resultatet. Det går att printa med olika nivåer av infill, vilket innebär att vid exempelvis 30% infill så innebär det att enbart 30% av komponenten

är solid. Detta är lämpligt att justera exempelvis ifall det är brist på tid eller ifall en viss komponent behöver vara extra hållfast.

Vid 3D-printing av stora delar krävs det att konstruktionen är anpassad så det går att skriva ut utan komplikationer. Komplikationer vid utskrivning kan uppstå på flera olika sätt. Vanligast är att materialet släpper från plattan vilket leder till att delen blir sned och därmed oanvändbar. Detta kan åtgärdas genom att printa delen med den största ytan nedåt för att få bästa möjliga fästkraft mot plattan (Prusa, 2024). Men det kan också vara så att vissa former avviker från dimensionerna i CAD-filerna. Exempelvis blir hål sällan helt cirkulära utan kan det kan skilja mot de önskade dimensionerna. Dessa komplikationer hänger ihop med hur delen är designad och därmed kommer delarna designas för att vara lättillverkade. Vid printing är det viktigt att tänka på vilket håll som lagrena läggs eftersom att delen är starkast i 90° vinkel mot det hållet lagren läggs.

2.4 Design av komponenter

Detta avsnitt presenterar den nya designen på de moduler som 3D-printas samt redovisar tillvägagångssättet för att säkerställa att designen uppfyller kraven som ställs på konstruktionen för att uppnå projektmålen.

2.4.1 Designaspekter

Den tidigare plastcykelns komponenter som presenterats i avsnitt 1.5 har designats om utifrån de identifierade svagheter och ytterligare designaspekter som presenteras i tabell 2.2. För att säkerställa att komponenterna uppfyller designaspekterna kommer varje 3D-printad komponent utvärderas utifrån de nio designaspekterna. Resultatet av detta presenteras i tabell 5.6.

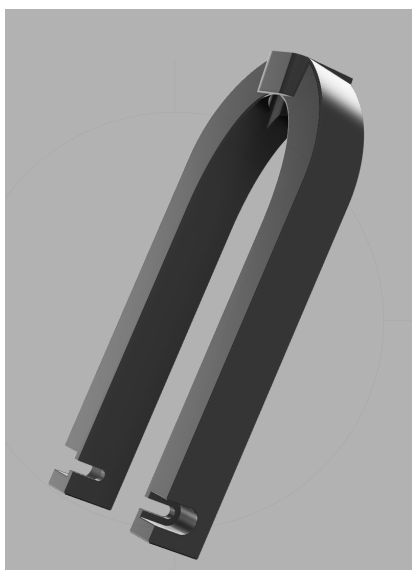
Tabell 2.2: Beskrivning av designaspekter och dess mål med motiveringar

Designaspekt	Mål	Motivering	Verifikation
1. Tjockare tvärsnitt på framgaffel	Projektmål 1	Detta för en styvare framgaffel, som förklarar i 1.5.2.1 och 1.5.2.2.	Jämförelse i dimension mellan föregående och ny framgaffel.
2. Utvändiga infästningar	Projektmål 1	Förklarar i avsnitt 1.5.2.4.	Ingen verifikation nödvändig.
3. Infästningar dimensionerade efter rören	Projektmål 1	Förklarar i avsnitt 1.5.2.4.	Test med bladmått för eventuellt glapp
4. Verklighetsliknande komponenter	Projektmål 2	För att uppnå en verklig-hetstrogen design.	Visuellt test med radar, beskrivet i 4.1.4.
5. Runda av skarpa hörn och kanter	Projektmål 2	Minskar risken för sprickbildning då spänningskoncentrationen är som högst i skarpa vinklar. Avrundning resulterar i mindre vikt vilket genererar mindre skada på bil och förare, som förklarar i avsnitt 1.5.2.4.	Visuell jämförelse med föregående och framtagna cykel
6. Minska vikt på komponenter	Projektmål 2	Resulterar i mindre vikt på hela cykeln. Det genererar mindre skada på bil och förare, som förklarar i avsnitt 1.5.2.4.	Jämförelse i vikt mellan föregående och nya komponenter.
7. Enkel montering & demontering	Projektmål 3	För att snabbt kunna ersätta en kraschad cykel.	Monteringstest.
8. Möjliggöra enkel 3D-printning	Projektmål 4	För att enkelt kunna skriva ut nya komponenter minimeras komplicerade geometrier.	Test med 3D-printer.
9. Nya rör på cykelkonstruktionen	Projektmål 4	Det är relevant att undersöka om det finns andra rör som uppfyller projekt målet bättre.	Ingen verifikation nödvändig.

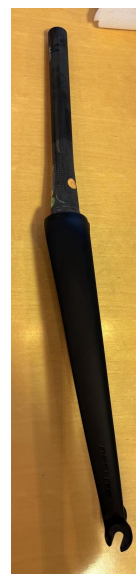
2.4.2 Framgaffel

Utifrån materialvalet i avsnitt 2.2, valdes kolfiber och PETG-plast som material för framgaffeln. Kolfiberframgaffeln, som visas i figur 2.6, köptes in då det ej fanns möjlighet att tillverka en egen.

Vid design av plastframgaffeln användes parametrarna från ekvation 1.1 och för att få ett högt tröghetsmoment valdes ett rektangulärt tvärsnitt. Ekvationen för yttröghetsmomentet med ett rektangulärt tvärsnitt är $I = \frac{bh^3}{12}$ (Sundström, 2020) där b är bredden på tvärsnittet och h är höjden på tvärsnittet. Vilket mått som blir h respektive b i ett tvärsnitt beror på vilken riktning kraften har, h följer alltid samma riktning som kraften och b är alltid vinkelrät mot kraften. Eftersom att framgaffeln primärt utsätts för krafter i en och samma riktning kan tröghetsmomentet optimeras genom att maximera h . Den inköpta kolfiberframgaffeln har ett ovalt tvärsnitt istället för ett kvadratisk men ett rektangulärt tvärsnitt valdes framför ett ovalt vid designen av plastframgaffeln. Det gjordes för att underlätta vid 3D printing, som förklarats i kapitel 2.3. Designen för framgaffeln i PETG-plast visas i figur 2.5.

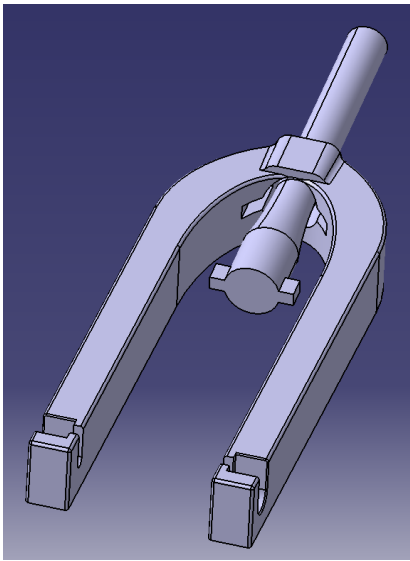


Figur 2.5: CAD-modell av framgaffel i PETG-plast.

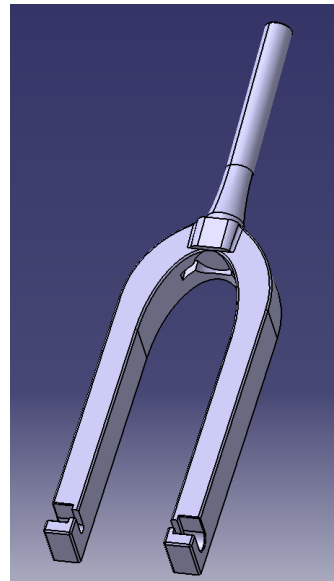


Figur 2.6: Framgaffel i kolfiber

Framgaffeln designades kortare än föregående cykels gaffel, detta för att öka styvheten som nämnt i kapitel 1.5.2.1, men också för att få samma mått som kolfiberframgaffeln. Det möjliggör byte mellan de båda gafflarna utan att ändra konstruktionsparametrarna för cykeln. Plastframgaffelns storlek gjorde att den inte kunde printas hel eftersom dimensionerna var för stora för 3D-skrivarna. Därmed fick den delas upp i två delar. Delningen gjordes genom att dela gaffeln i en övre och undre del som pressas ihop, se figur 2.7 och 2.8.



Figur 2.7: Plastframgaffel delad

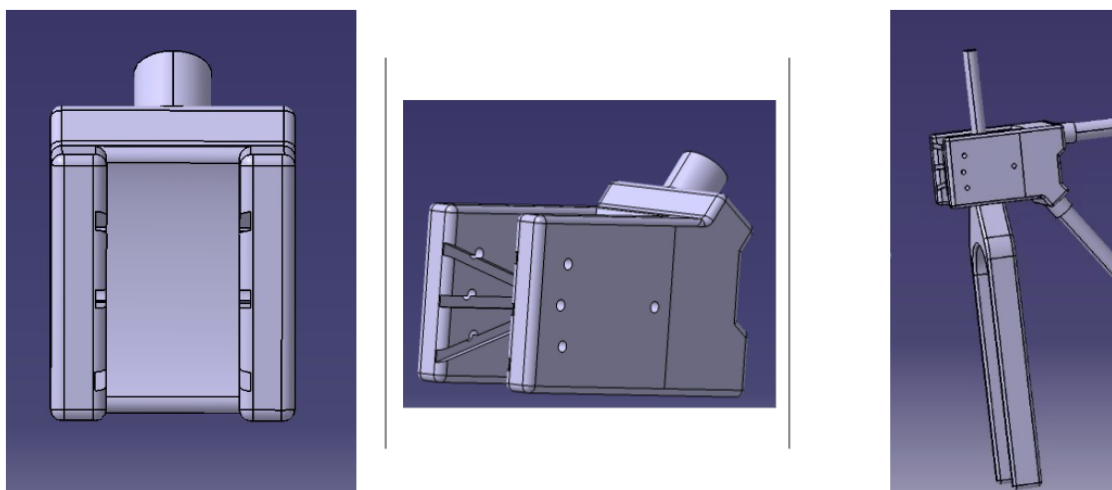


Figur 2.8: Plastframgaffel ihopsatt

2.4.3 Justerbar huvudvinkel

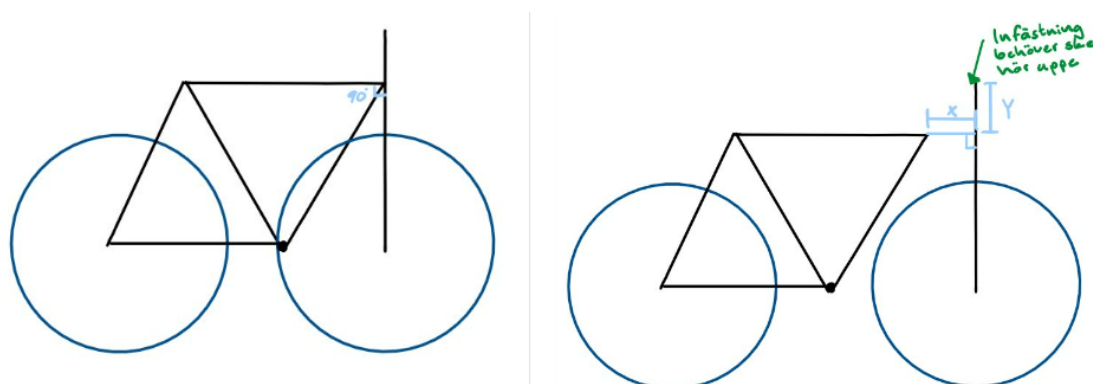
Det är av intresse att undersöka påverkan av huvudvinkeln på cykelns självbalansering, som nämnt i kapitel 1.5.2.3. Det togs fram tre lösningsförslag, nedanför presenteras de tre lösningsförslag som genererats för en justerbar huvudvinkel. Det tredje lösningsförslaget "Kronmodul" var det som valdes att tillverkas.

Första lösningsförslaget var att implementera en mekanism på kronröret på cykeln som skulle luta hela den främre axeln på cykeln för att således uppnå ett flertal olika huvudvinklar. Lösningen visas nedan i figur 2.9.



Figur 2.9: CAD-modeller på första lösningen av justerbar huvudvinkel

Problemet med lösningen är att vid justering till en huvudvinkel på 90° kolliderar cykelramen med framhjulet, visualiserar i figur 2.10.

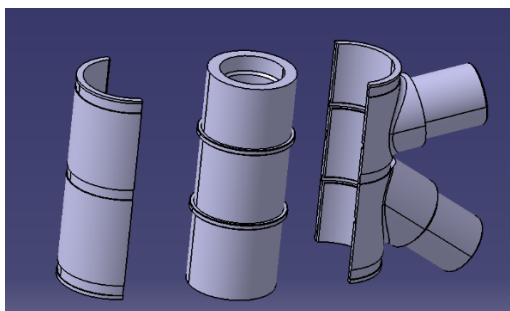


Figur 2.10: Problem med första lösningen till justerbar huvudvinkel

För att använda sådan mekanism behövdes, utöver justering av huvudvinkel, infästningen av framgaffeln i ramen förflyttas för att undvika att hjulet kolliderar med ramen. En sådan mekanism, som både förlyttar infästningen och justerar huvudvinkeln i en rörelse, hade lett till en svårtillverkad mekanism med ett flertal rörliga delar. I enlighet med projektmål 3, som presenteras i avsnitt 1.2 avfärdades den här lösningen.

Andra lösningsförslaget var att producera olika kronrör med olika vinklar och position. Dessa ska kunna avmonteras från cykelramen och bytas sinsemellan. Det här möjliggör att ställa huvudvinkeln i tre olika vinklar med en och samma cykelram. Det här lösningsförslaget valdes bort på grund av svårigheter med att avmontera styrlager på cykeln.

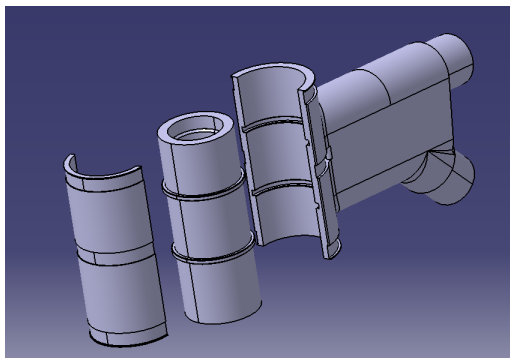
Tredje lösningsförslaget var att modularisera kronröret som figur 2.11 visar nedan.



Figur 2.11: Kronmodul med främre del till vänster, mittdel i mitten och bakre del till höger

Det här lösningsförslaget på kronrör består av tre delar bestående av en mittdel en främre del en bakre del ses i figur 2.11. I mittendelen monteras styrlager och

framgaffeln. Den bakre och främre delen spänns ihop runt mittendelen med hjälp av slangklämmor. Den bakre delen fästs sedan till ramen. Genom att modulera kronröret till en "kronmodul" behöver endast den bakre delen ändras för att ändra cykelns huvudvinkel. Detta medför att samma mitt- och framdel kan användas till alla olika huvudvinklar vilket eliminerar behovet att demontera styrlagret vilket underlättar justering av huvudvinkel, se figur 2.12. För att säkerställa att mittdelen inte kommer förskjutas upp och ned mellan bakre och främre del görs flänsar som passar i spår.



Figur 2.12: Kronmodul med 90 graders bakre del.

2.4.4 Cykelram

Föregående cykelram tillät inte implementering av justerbar huvudvinkel samt att kolfiberframgafflar som fanns att köpa inte kan monteras på den föregående cykelramen. Föregående cykelns CAD-modeller fanns inte heller tillgängliga, så justering av föregående design var därav inte möjlig. Design av en ny cykelram var därmed nödvändig för att kunna implementera justerbar huvudvinkel samt för byte och tester av olika framgafflar. För att bättre uppnå projektmål 2, 3 och 4 i avsnitt 1.2 så konstruerades de tjockare rören av cykelramen med avloppsrör i PP-plast, som visas i appendix A.1.

Avloppsrör har god tillgänglighet och är billigare än föregående cykelram vilket gör att projektmål 3 och 4 uppfylls. Avloppsrören som valdes hade en diameter på 50 mm vilket var mindre än föregående cykelrams tjocka rör samt att de har lägre densitet. Detta gjorde att cykelramen blev lättare vilket är i enlighet med projektmål 2. De tunnare rören vid bakhjulet behölls i samma dimensioner som den gamla cykeln då det inte sågs någon förbättringspotential där.

2.4.5 Sadel

Sadeln designades utifrån aspekterna presenterade i tabell 2.2 och har minskat i storlek för att få så låg vikt som möjligt för att uppfylla projektmål 2. Vassa kanter och skarpa hörn har också tagits bort för att uppfylla projektmål 2. Den har även designats med stora övergångar mellan utstickande delar och bas för att undvika sprickbildning. Den slutgiltiga sadeldesignen ses i figur 2.13.



Figur 2.13: Slutgiltig design av sadeln.

2.4.6 Bottenmodul

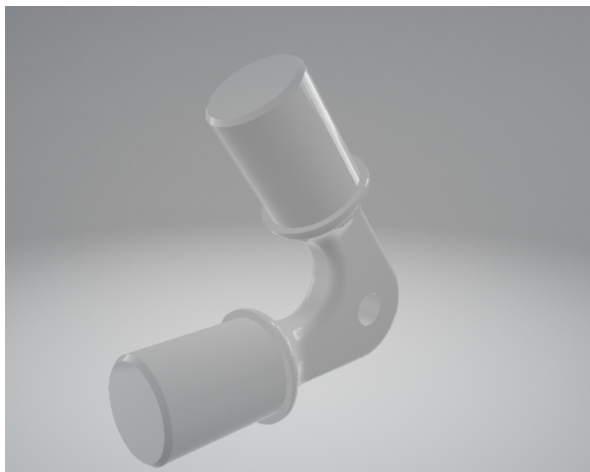
Bottenmodulen, likt sadeln, designades utifrån aspekterna som är presenterade i tabell 2.2. Vassa kanter samt skarpa hörn har rundats av. Där infästningen av rören sker fasas kanterna av för att uppnå enkel montering och demontering enligt tabell 2.2. Den slutgiltiga designen för bottenmodulen ses i figur 2.14.



Figur 2.14: Slutgiltig design av bottenmodulen.

2.4.7 Bakre infästningar

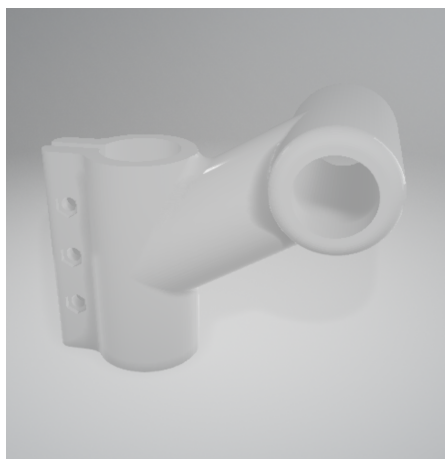
Designen av bakre infästningarna skiljer sig inte avsevärt mycket från tidigare design. Dels för att de är små komponenter, men även för att den föregående lösningen var bra. På de nya infästningarna har det implementerats stopp för att säkerställa att rören ansluter på samma avstånd, se figur 2.15.



Figur 2.15: Slutgiltig design av bakre infästningar.

2.4.8 Fäste för styre

Ett nytt fäste för styre designades för att passa den framtagna designen. Fästet designades för att lätt kunna monteras och demonteras genom skruvförband, se figur 2.16.



Figur 2.16: Slutgiltig design för fäste för styre

3

Konstruktion

Kapitlet redovisar resultatet efter framställning av komponenterna med hjälp av 3D-printning samt hur plastcykeln monterades ihop.

3.1 Konstruktion

Komponenterna som designades i avsnitt 2.4 framställdes genom 3D-printning, som förklarats i avsnitt 2.3, presenteras i detta delkapitel.

3.1.1 Framgaffel

Plastframgaffeln printades ut i PETG-plast i en CR10 5S printer då komponentens dimensioner krävde detta. Vid printning släppte gaffeln från printbädden vilket ledde till att hålet där axeln monteras i inte blev helt runt vilket behövdes åtgärdas i efterhand. Detta ledde till att monteringen och konstruktionen av plastframgaffeln blev mer komplicerad än kolfiberframgaffeln. Styraxeln till plastframgaffeln printades i PETG-plast i en Prusa Mk4.



Figur 3.1: Ihopsatt plastframgaffel

3.1.2 Kronmodul

Kronmodulen printades ut i PETG-plast i en Prusa Mk4 printer. Lagerytorna för montering av styrlager i mittenmodulen har mindre toleranser än resterande delar och därför valdes det att printa insatshylsor som lagren kunde monteras i. Anledningen till att insatshylsor användes istället för att göra hela kronmodulen med högre precision är för att det är mer tidseffektivt. För att försäkra en stabil montering av styrmotorn gjordes framsidan av modulen platt, se figur 3.2 och 3.3.



Figur 3.2: Bakre och främre del i kronröret.



Figur 3.3: Bakre och främre del monterad med slangklämmor och aluminiumfäste för styrmotorn.

Monteringen av styrlager och remhjul redovisas i figur 3.4. Remhjulet monteras genom konisk klämbussning där den invändiga konan är 3D-printad för optimal passform och klämkraft runt framgaffeln, se figur 3.5. Vid monteringen av styrlager krävs ihoppresning mellan över- och underdel av styrlagret. Det görs genom att skruva fast remhjulet mot en distans som sedan trycker på styrlagret se figur 3.6. Det är viktigt att få till en åtsittande montering för att minimera glapp i styrlagret. Remhjulet pressas mot en distans istället för att direkt pressas på styrlagret för att underlätta demontering.



Figur 3.4: Mittenmodul som fäster framgaffel med kullager och remskiva



Figur 3.5: Infästning av remhjul på kolfiberframgaffel



Figur 3.6: Remhjul som pressar mot distans och styrlager.

I figur 3.7 ses kronmodul med 73° huvudvinkel färdigmonterad med hjälp av slangklämmor och i figur 3.8 ses kronmodulen monterad med 90° huvudvinkel.



Figur 3.7: Färdigmonterad kronmodul med 73° huvudvinkel.



Figur 3.8: Färdigmonterad kronmodul med 90° huvudvinkel.

3.1.3 Sadel

Sadeln printades i en CR10 5S med 30 % infill då det var den enda tillgängliga 3D-printern som kunde printa sadelns dimensioner.



Figur 3.9: Sadel sett framifrån från vänster



Figur 3.10: Sadel sett bakifrån från vänster

3.1.4 Bottenmodul

Bottenmodulen printades i en CR10 5S printer med 30% infill, även den på grund av dess stora dimensioner. Den printas stående för att minimera stöden och få bästa möjliga tillverkningsbarhet.



Figur 3.11: Bottenmodul sett framifrån från vänster



Figur 3.12: Bottenmodul sett bakifrån från vänster

3.1.5 Bakre infästningar

De bakre infästningarna printades i en Prusa MK4. Den första iterationen printades med en infill på 30% som sprack vid montering. Detta åtgärdades genom att göra dem helt solida.



Figur 3.13: Bakre infästningar

3.1.6 Styre

Styret printades ut och sedan sattes ett rör fast för att mer efterlikna ett verkligt styre, se figur 3.14. Styret fästes med tre skruvar och tre muttrar, se figur 3.15.



Figur 3.14: Styret



Figur 3.15: Infästningen på styret

3.1.7 Övriga ändringar i konstruktion

Utöver designändringarna som grundades i problembeskrivningarna i kapitel 1.2 genomfördes ett antal ändringar för att underlätta montering av alla elektriska komponenter, tillgängliggöra tidigare beställda komponenter samt underlätta hanteringen av plastcykeln. Dessa förändringar presenteras i tabell 3.1.

Tabell 3.1: Förändringar utöver problembeskrivningen

Förändringar
3D-printad remskiva
Kronrör designat för att fästa styrmotor enklare.
Egendesignad aluminiumskiva.
Styre för enklare hantering.

3.2 Montering av cykel

Cykeln designades för att göra den lätt att montera. Detta för att möjliggöra att olika konstruktioner kunde testas utan att på- och avmonteringen tog för lång tid. Detta är också viktigt då cykeln ska vara kraschvänlig, det ska inte vara krångligt eller tidskrävande att montera cykeln, i enlighet med projektmål 3. Detta gjordes genom att göra infästningarna på så sätt att rören omslöt infästningarna och fästes sedan med hjälp av slangklämmor. Det här skapade en hållfast konstruktion som också var lätt att justera vid behov, se figur 3.16 och 3.17.



Figur 3.16: Infästning innan montering **Figur 3.17:** Infästning efter montering

Slangklämmor medför en simpel montering och demontering av bland annat kronrör och ram för tester av olika huvudvinklar och framgafflar. Användningen av slangklämmor medför en hög klämstyrka för fästning över en stor area kring rören i jämförelse med skruv och mutter. Det här var en viktig aspekt då det riskeras sprickbildning för de 3D-printade plastdetaljerna vid punktbelastning vid användning av skruv och mutter. Samtliga moduler monterades ihop på detta sätt.

4

Verifiering

4.1 Verifiering av konstruktion

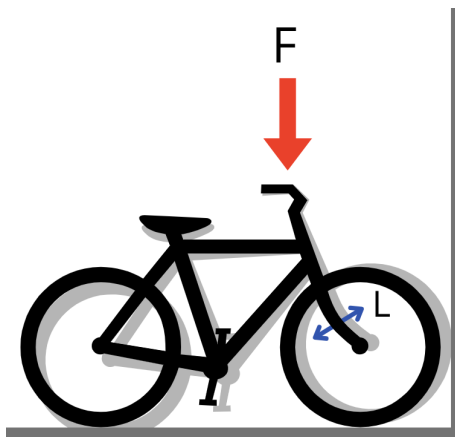
I detta kapitel presenteras hur de problem som beskrivs i kapitel 1.5 testas på den nya konstruktionen.

4.1.1 Verifiering av deformation av framgaffel

För att testa deformationen i framgaffeln kommer en punktlast appliceras på styret, se figur 4.1. Testet kommer utföras enligt följande:

- Cykelns framdäck kommer sättas mot en vägg och hållas fast så att det inte kan röra sig framåt.
- En kraft på 100N appliceras på mitten av styret som kommer introducera eventuell deformation.
- Deformationen mäts.

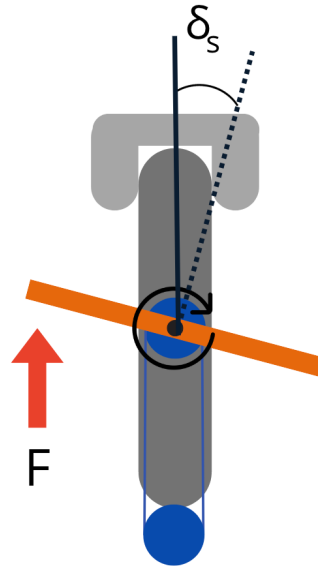
Anledningen till användningen av en kraft på 100 N är för att det är uppskattningsvis vad lådan med styr- och reglersystemet väger. Detta är det som ska sitta på cykeln vid självkörning. Testet görs på båda framgafflarna, men även på föregående projekts cykel för att jämföra resultat.



Figur 4.1: Deformationstest

4.1.2 Verifiering av avvikelse mellan hjulvinkel och styrvinkel

Ett flexibilitetstest kommer genomföras genom att låsa fast framhjulet och sedan vrida på styret med en kraft på 100 N, se figur 4.2. Sedan mäts hur mycket styrvinkeln skiljer sig från hjulvinkeln. Detta test görs på båda framgafflarna, men även på föregående cykel för att kunna jämföra resultat.



Figur 4.2: Illustration över testet för avvikelserna mellan hjul och styrvinkel

4.1.3 Verifiering av justerbar huvudvinkel

För att verifiera om det är möjligt att justera huvudvinkel undersöktes huruvida huvudvinkeln kan bytas utan att behöva byta cykel. Detta görs som beskrivit i det tredje lösningsförslaget i kapitel 2.4.3.

4.1.4 Verifiering av övriga svagheter med föregående design

De svagheter som verifierades var som nämnt i kapitel 1.5.2.4:

- Glapp mellan komponenter
- Vassa och klumpiga delar
- Föregående cykel såg inte ut som en vanlig cykel

Glappet mellan komponenter mäts med hjälp av ett bladmått. Vassa och klumpiga delar har redan undersökts och en avrundning av kanterna har implementerats, detta påvisas i kapitel 2.4. För att undersöka om sensorerna på Volvo Cars bilar uppfattar plastcykeln som en riktig cykel utfördes två detektionstest som visas i figur 4.3 och 4.4.

4.1.4.1 Detektionstest 1

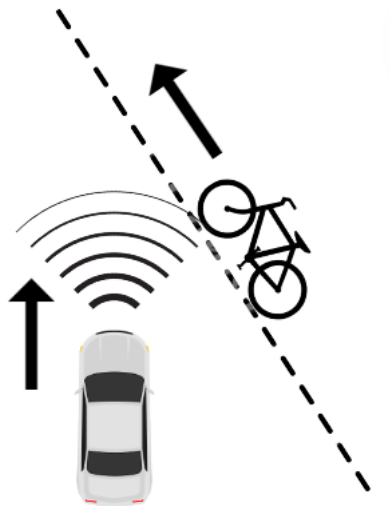
1. Bilen står still.
2. Cykeln kör på en rak linje ungefär 5 meter från bilen.
3. Bilens system ska identifiera cykeln som en cykel. Cykeln kommer, ifall den blir identifierad, uppkomma som en rektangulär box i bilens radar.
4. Testet utförs 10 gånger för att säkerställa resultatet.



Figur 4.3: Detektionstest 1

4.1.4.2 Detektionstest 2

1. Cykeln körs ut framför bilen som börjar köra efter den.
2. När bilen börjar närma sig cykeln ska bilens sensorer uppfatta ifall det är en cykel som är framför. Om sensorerna uppfattar att det är en cykel kommer en rektangulär box upp på radaren som indikerar på att den ser en cykel .
3. Skulle bilens sensorer uppfatta cykeln som för nära bilen ger den först en varning för att vid närmre avstånd bromsa.
4. Testet utfördes 10 gånger för att säkerställa resultatet.



Figur 4.4: Detektionstest 2

4.1.5 Verifiering av självbalansering

För att verifiera cykelns självbalansering och självstyrning med hjälp av styr- och reglersystemet togs fyra tester fram med olika rutter som skulle testa olika egenskaper för cykeln. Vid testdagen på AstaZeros testbanor var dock inte styr- och reglersystemet tillgängligt, då problem uppstått med styr- och reglersystemet som gjorde att det inte gick att montera på cykeln. De test som var planerade att genomföra redovisas i kapitel 6.2. På grund av detta fick cykeln testas manuellt utan styr- och reglersystemet.

För att testa cykelns självbalansering utan ett styr- och reglersystem knuffades cykeln manuellt iväg med en uppskattad hastighet på 4 m/s i ett rakt utgångsläge för att se hur långt den kunde hålla balansen, se figur 4.5. Testet gjordes 10 gånger för att säkerställa resultatet.



Figur 4.5: Körtest

5

Resultat

I detta kapitel presenteras de slutgiltiga konstruktionerna och resultaten från testerna som gjordes för att verifiera cykelns egenskaper.

5.1 Konstruktion

I detta kapitel presenteras de slutgiltiga konstruktionerna i sin helhet.

5.1.1 Framtagen konstruktion med framgaffel i kolfiber

Resultatet av konstruktionen för cykeln med framgaffel i kolfiber och huvudvinkel på 73° presenteras i figur 5.1 och dess konstruktionsparametrar presenteras i tabell 5.1.



Figur 5.1: Cykel med framgaffel i kolfiber och huvudvinkel, $\lambda = 73^\circ$

Tabell 5.1: Parametrar för cykeln med kolfiberframgaffel och 73° huvudvinkel

Beskrivning	Värde
Massa	6,31 kg
Huvudvinkel	73°
Trail	0.15 m
Hjulbas	1.09 m
Massa utan hjul	3,91 kg
Viktminskning jmf. med föregående cykel	18,54%

Resultatet av konstruktionen för cykeln med kolfiberframgaffel och huvudvinkel på 90° presenteras i figur 5.2 och dess konstruktionparametrar presenteras i tabell 5.2.



Figur 5.2: Cykel med framgaffel i kolfiber och huvudvinkel, $\lambda = 90^\circ$

Tabell 5.2: Parametrar för framgaffel i kolfiber och huvudvinkel, $\lambda = 90^\circ$

Beskrivning	Värde
Massa	6,61 kg
Huvudvinkel	90°
Trail	0 m
Hjulbas	1.10 m
Massa utan hjul	4,21 kg
Viktninskning jmf. med föregående cykel	12,29%

5.1.2 Framtagen konstruktion med framgaffel i PETG-plast

Resultatet av konstruktionen för cykeln med framgaffel i PETG-plast och huvudvinkel på 73° presenteras i figur 5.3 och dess konstruktionsparametrar presenteras i tabell 5.3.

**Figur 5.3:** Cykel med framgaffel i PETG-plast och huvudvinkel, $\lambda = 73^\circ$

Tabell 5.3: Parametrar för cykeln med framgaffel i PETG-plast och $\lambda = 73^\circ$

Beskrivning	Värde
Massa	6,60 kg
Huvudvinkel	73°
Trail	0.15 m
Hjulbas	1.09 m
Massa utan hjul	4,20 kg
Viktminskning jmf. med föregående cykel	12,50%

Resultatet av konstruktionen för cykeln med framgaffel i PETG-plast och huvudvinkel på 90° presenteras i figur 5.4 och dess konstruktionsparametrar presenteras i tabell 5.4.

**Figur 5.4:** Cykel med framgaffel i PETG-plast och huvudvinkel, $\lambda = 90^\circ$

Tabell 5.4: Parametrar för cykeln med framgaffel i PETG-plast och $\lambda = 90^\circ$

Beskrivning	Värde
Massa	6,90 kg
Huvudvinkel	73°
Trail	0 m
Hjulbas	1.10 m
Massa utan hjul	4,50 kg
Viktminskning jmf. med föregående cykel	6,25%

5.2 Justerbar huvudvinkel

Problemet med den justerbara huvudvinkeln resulterade i en lösning med en modulariserad styrkrona. Den modulariserade styrkronan, som visas i figur 5.5, har en mittenmodul där framgaffeln och styrlagret är fästa i samt ytterligare två delar av modulen som omsluter denna. Den bakre modulen har producerats i två olika varianter för att möjliggöra ett enkelt byte mellan de två önskade huvudvinklarna, 73° och 90° .

**Figur 5.5:** Till vänster: Modul för $\lambda = 90^\circ$. Till höger: Modul för $\lambda = 73^\circ$.

5.3 Test av deformation i framgaffeln

Från deformationstestet, som beskrevs i kapitel 4.1.1, gavs följande resultat som presenteras i tabell 5.5:

Tabell 5.5: Resultat från deformationstester

	kolfiberframgaffel	Plastframgaffel	Föregående cykel
90°	Ingen synlig deformation	2 mm	-
73°	Ingen synlig deformation	3,5 mm	-
Föregående cykel	-	-	9 mm

5.4 Test av avvikelse mellan hjulvinkel och styrvinkel

Från flexibilitetstestet, som beskrivits i kapitel 4.1.2, gavs följande resultat som presenteras i tabell 5.6:

Tabell 5.6: Resultat från flexibilitetstester med 100 N pålagt

	Kolfiberframgaffel	Plastframgaffel	Föregående cykel
Vinkelskillnad	Ingen vinkelskillnad	Ingen vinkelskillnad	17°

5.5 Kör- och detektionstester

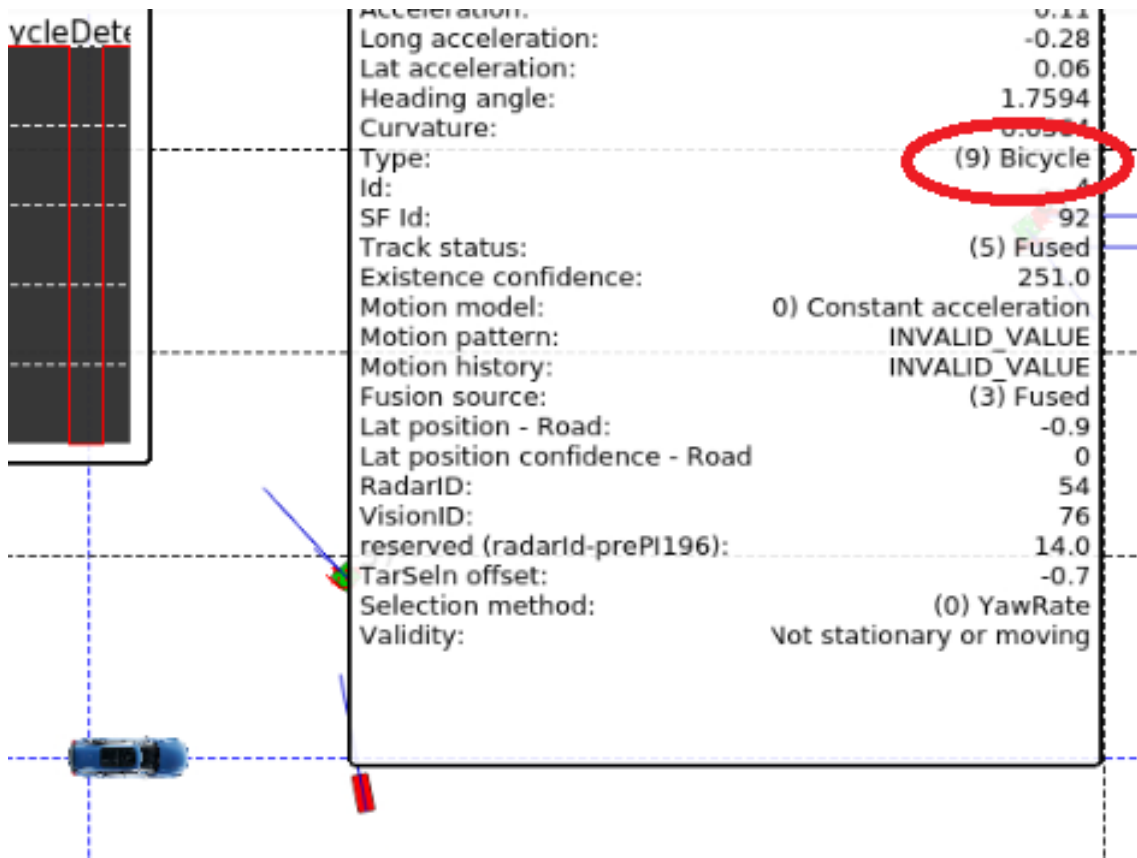
Från kör- och detektionstesten som beskrivits i kapitel 4.1.4 och 4.1.5 gavs följande resultat, presenterade i tabell 5.7:

Tabell 5.7: Testresultat från körtest med 73° huvudvinkel

Testförsök	Sträcka (kolfiber)	Sträcka (PETG-plast)
1	78 meter	34 m
2	58 meter	37 m
3	69 meter	32 m
4	70 meter	29 m
5	54 meter	34 m
6	52 meter	29 m
7	58 meter	39 m
8	62 meter	26 m
9	49 meter	27 m
10	47 meter	30 m
Genomsnittlig sträcka	59,7 meter	31,7 meter

Testet genomfördes även med 90° huvudvinkel med både framgaffeln i kolfiber och PETG-plast men den hade inte förmågan att självbalansera utan välte omedelbart efter den släppts iväg och kom således ingenstans.

Från detektionstest 1 uppfattade bilens sensorer cykeln vid varje testtillfälle, se figur 5.6. Kameravyn, visat i figur 5.7 överensstämde även med radarvyn.

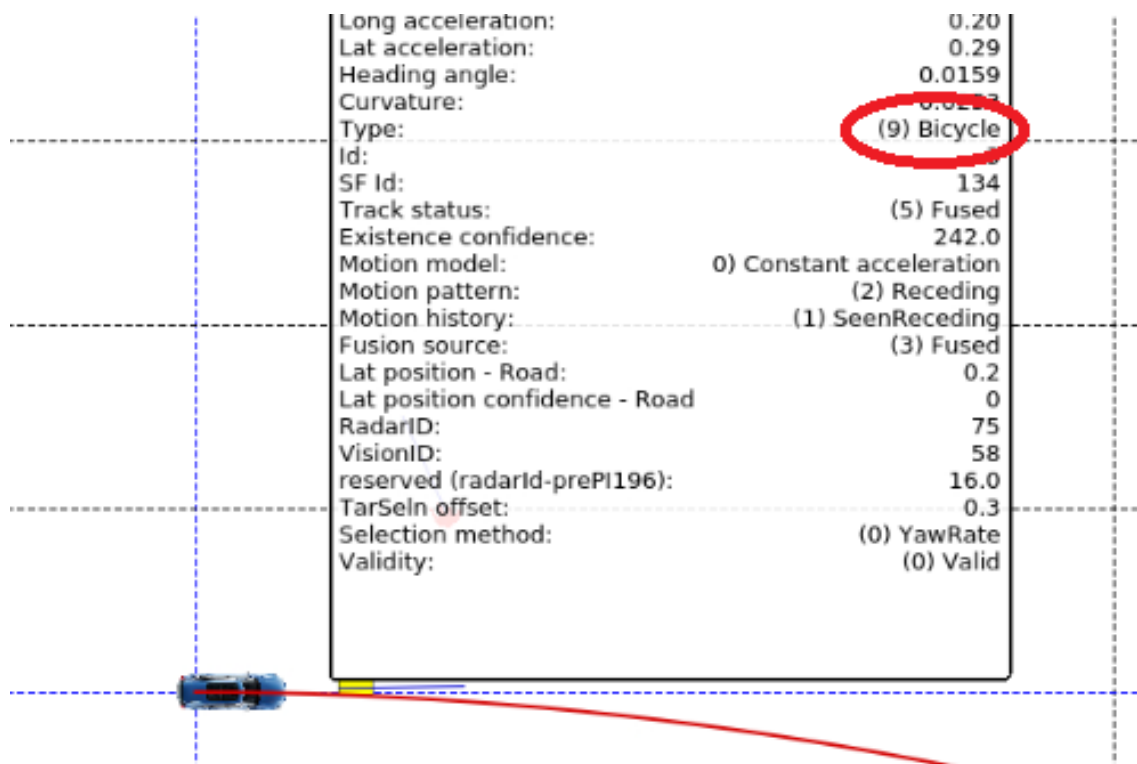


Figur 5.6: Detektionstest 1: Radarvyn



Figur 5.7: Detektionstest 1: Kameravyn

Från detektionstest 2 uppgav sensorerna en varning om en cykel vid alla tio testförsök, se figur 5.8 och då testföraren inte körde tillräckligt nära cykeln valde aldrig sensorerna att bromsa. Kameravyn, visat i 5.9 överensstämde även med radarvyn.



Figur 5.8: Detektionstest 2: Radarvy



Figur 5.9: Detektionstest 2: Kameravy

5.6 Designaspekter

I detta kapitel presenteras resultatet av de framtagna komponenterna och hur väl de uppfyllt designaspekterna som presenterats i 2.4.1. I tabell ?? presenteras resultatet av de nykonstruerade komponenterna var för sig och hur väl de uppfyllt de respektive designaspekter som presenterades i 2.4.1.

Förklaring av beteckningar som används för tabell 5.8:

- + : Förbättring gentemot föregående design/Avklarat
- - : Försämring gentemot föregående design/Ej avklarat
- N/A : Ej relevant för komponenten
- 0 : Varken förbättring eller försämring gentemot föregående design

Tabell 5.8: Resultat komponenter enligt designaspekter

Designaspekter	Kronrör	Plastframgaffel	Sadel	Bottenmodul	Bakre infästningar	Cykelram
1	N/A	+	N/A	N/A	N/A	N/A
2	+	N/A	+	+	+	N/A
3	+	N/A	+	+	+	N/A
4	+	+	+	+	+	+
5	0	-	+	+	+	N/A
6	+	-	+	+	+	+
7	+	+	+	+	+	+
8	+	+	+	+	+	N/A
9	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	+

5.6.1 Tjockare tvärsnitt på framgaffeln

Föregående framgaffel var cirkulärt utformat med en diameter på 25mm. Det här ger ett areatvärsnitt på 490.8mm². Den nya PET-G framgaffeln är rektangulärt utformat med en höjd på 50mm och en bredd på 30mm. Det här ger en tvärsnittsarea på 1500mm².

5.6.2 Utvändiga infästningar

Den nykonstruerade cykelns komponenter har utvändiga infästningar.

5.6.3 Dimensionerade infästningar efter rören

Efter mått med bladmått ned till och med 0.05mm kunde inget glapp på någon av komponenterna uppmätas.

5.6.4 Verklighetsliknande komponenter

Resultat för utvärdering av verklighetsliknande komponenter är resultat från kör- och detektionstester där plastcykeln uppfattades som en cykel av bilens sensorer, se figur 5.6 och 5.8.

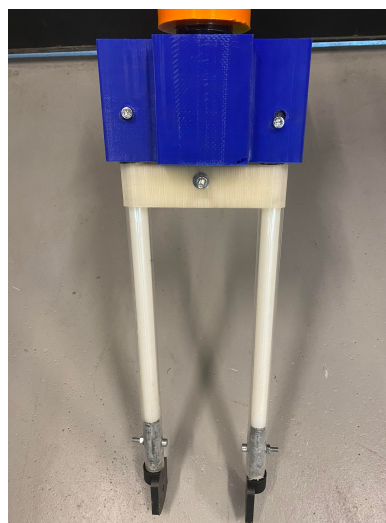
5.6.5 Runda av skarpa hörn och kanter

En visuell jämförelse mellan föregående komponenter och framtagna komponenter visas i figur 5.10 till 5.21.

Framgaffel



Figur 5.10: Framtagen framgaffel

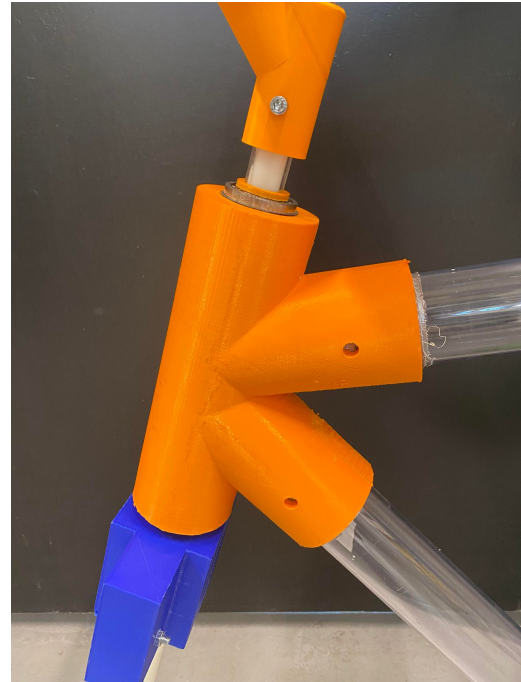


Figur 5.11: Föregående framgaffel

Kronrör



Figur 5.12: Framtaget kronrör



Figur 5.13: Föregående kronrör

Styre



Figur 5.14: Framtaget styre

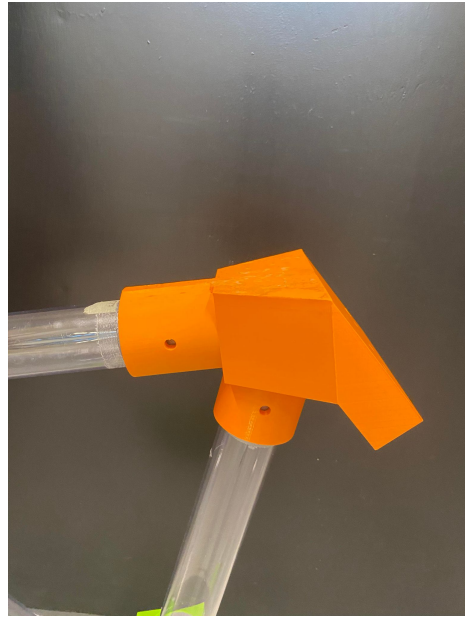


Figur 5.15: Föregående styre

Sadel



Figur 5.16: Framtagen sadel

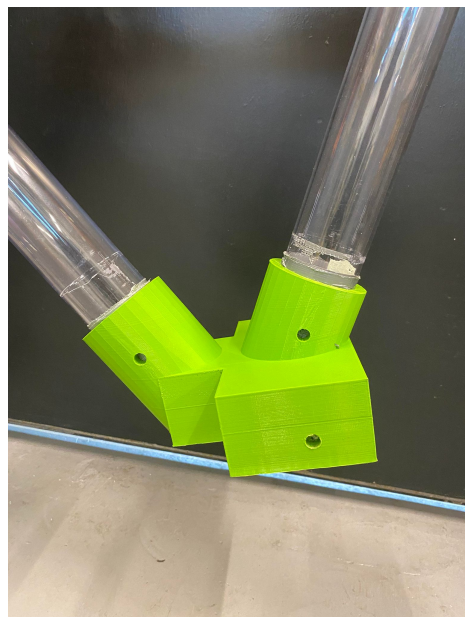


Figur 5.17: Föregående sadel

Bottenmodul



Figur 5.18: Framtagen bottenmodul

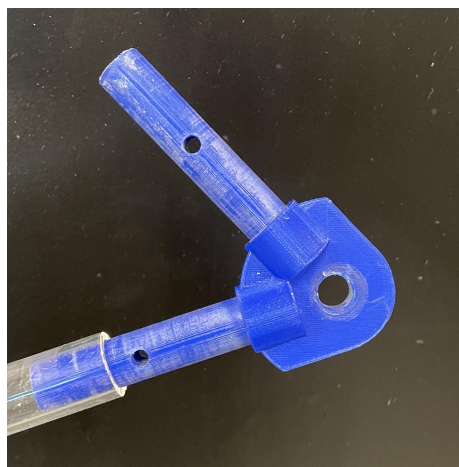


Figur 5.19: Föregående bottenmodul

Bakre infästning



Figur 5.20: Framtagen bakre infästning



Figur 5.21: Föregående bakre infästning

5.6.6 Minskad vikt på komponenter

Tabell 5.9: Vikt för varje komponent för den nya cykeln

Komponent:	Plastframg.	Kronrör 73°/90°	Sadel	Bottenkomponent	Bakre infästning
Vikt:	550 g	290/590 g	730 g	500 g	5 g

Ingen vikt för föregående komponenter var tillgänglig.

5.6.7 Enkel montering och demontering

Konstruktionen, som beskrivet i kapitel 3.1, tillåter både enkel montering och demontering.

5.6.8 Möjliggöra enkel 3D-printning

Framtagandet av komponenterna gjordes enligt metod beskrivet i avsnitt 2.3. Det var möjligt att 3D-printa alla komponenter.

5.6.9 Nya rör på cykeln

Nya rör i PP-plast användes i den nya konstruktionen med diameter på 50 mm.

6

Slutsats och diskussion

6.1 Diskussion om konstruktion

I detta avsnitt diskuteras hur väl konstruktionen på cykeln utfördes utifrån designaspekter, material och hur PETG-framgaffeln presterade i testerna.

6.1.1 Diskussion om materialval

Utifrån grafen i materialvalet, som visas i figur 2.4, visades det att även trä, aluminium och stål hade varit bra kandidater till en framgaffel för en cykel. Stål och aluminiums lämplighet för en framgaffel är vedertaget då de är bland de vanligaste materialen för framgafflar inom cykelindustrin. Då det redan tagits fram cyklar och framgafflar av dessa material i projektet valdes det att inte vidare analysera dessa. Trä exkluderades främst på grund av brist på möjlighet att tillverka en sådan framgaffel. Det var även ej möjligt att köpa en framgaffel i trä då de inte finns på marknaden.

6.1.2 Diskussion om designaspekter

I tabell 5.9 presenteras vikten på alla komponenter individuellt, det går dock inte att avgöra huruvida de blev lättare än föregående cykels komponenter då det inte är möjligt att demontera den för att jämföra komponenterna. Däremot så har den totala vikten minskat vilket indikerar att komponenterna väger mindre. Viktminskningen vid de olika varianterna presenteras i tabellerna 5.1 - 5.4. Den största viktminskningen är 18,54% med kolfibergaffeln och kronmodulen som möjliggör 73° huvudvinkel. Den minsta viktminskningen är 6,25% med PETG-gaffeln och kronmodulen som möjliggör 90° huvudvinkel.

Presenterat i tabell 5.8 är utvärdering av komponenterna och resultaten mot designaspekterna. Som presenterat i tabellen är det framförallt designen av framgaffeln i PETG som inte lyckades förbättras på en majoritet av designaspekterna. Framgaffeln försämrades även på designaspekt 2 och 6. För att uppfylla designaspekt 1, vilket var den designaspekt som var viktigast för framgaffeln, begränsades möjligheten med att runda av hörn och kanter. Resultatet för PETG framgaffeln blev en större komponent. Det här berodde på att det finns komplikationer med att skapa större delar med 3D-printing, se avsnitt 2.3.

Kronrörets konstruktion blev en modul som förbättrades i alla relevanta designaspekter, som visat i kapitel 5.6, förutom avrundning av skarpa hörn och kanter. Detta kunde inte göras möjligt då kronrörets dimensioner vid 3D-printning inte tillät större avrundning än föregående cykels kronrör, vilket gjorde att det varken blev en förbättring eller försämring gällande den designaspekten.

Resultatet för sadeln blev en komponent med förbättring på alla designaspekter som var relevant för denna, som redovisats i kapitel 5.6.

Resultatet för bottenmodulen blev en komponent med förbättring på alla designaspekter som var relevant för denna, som presenterats i kapitel 5.6.

Resultatet för de bakre infästningarna blev två komponenter med förbättring på alla designaspekter som var relevant för denna, som redovisats i kapitel 5.6.

Cykelramens design resulterade i användningen av avloppsrör. Dessa är mer lik de rör som vanligtvis används på cyklar gällande dess storlek i jämförelse med de akrylrör som utnyttjades i föregående konstruktion. Rören var även lättare och tillåter för enkel demontering och avmontering. Vidare är avloppsrören mer lättillgängliga än akrylrör vilket är en viktig aspekt för lätt och kraschvänlig, se projektmål 3.

6.2 Diskussion om tester

Resultaten i kapitel 5.3 visar att den nya konstruktionen på framgaffeln är en klar förbättring från föregående konstruktion av Alzein m.fl. (2023) med avseende på hur den presterar i flexibilitetstesterna. Då framgaffeln i kolfiber inte uppvisade någon deformation och framgaffeln i PETG-plast uppvisade liten deformation i relation till föregående framgaffel vid pålagd belastning går det att konstatera att problemet beskrivet i kapitel 1.5.2.1 är löst. Framgafflarna i kolfiber och PETG-plast är även lätta, 380 g respektive 550 g, vilket gör att de är i enlighet med projektmål 2. Framgaffeln i PETG-plast går att tillverka med hjälp av 3D-skrivning vilket gör att projektmål 3 och 4 uppfylls.

I kapitel 5.4 framkommer det att ingen vinkelskillnad mellan framhjul och styre uppkommer i den nya konstruktionen med någon av framgafflarna. Detta innebär att problemet beskrivet i kapitel 1.5.2.2 uppfylls. Avsaknaden av vinkelskillnad innebär också att vid ett eventuellt test med ett styr- och reglersystem att systemet får rätt information och kan därav ge exakta direktiv till cykeln, vilket är i enlighet med projektmål 1.

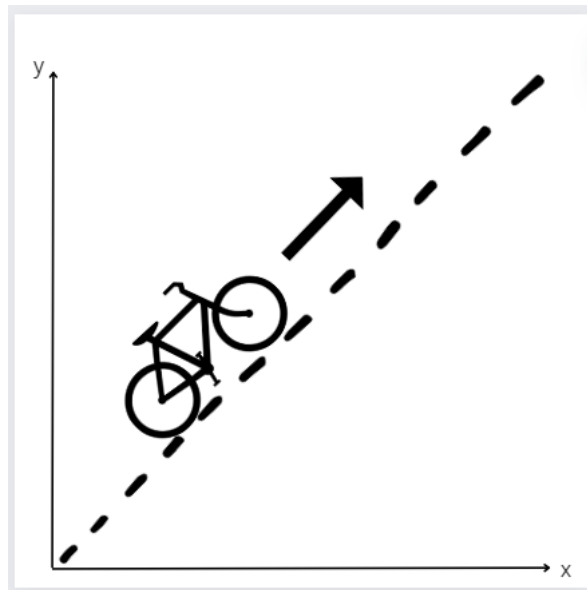
Trots avsaknaden av ett styr- och reglersystem visade cykeln prov på en god självbalansering med både framgaffeln i kolfiber och PETG-plast då den, som visat i tabell 5.7, åkte stabilt över en genomsnittssträcka på 59,7 respektive 31,7 meter. Utan att ha definitiva resultat indikerar detta att projektmål 1 kan uppfyllas. Däremot kunde inte cykeln självbalansera när huvudvinkeln var 90° oavsett vilken framgaffel som användes. Ifall styr- och reglersystemet varit tillgängligt hade dess

självkörning varit intressant att undersöka.

6.3 Eventuella förbättringar och vidarearbeten

Det var ursprungligen tänkt att cykeln skulle testas om den kunde självköra med ett styr- och reglersystem. Då detta inte togs fram i tid, som nämnt i kapitel 4.1.4 och 4.1.5, fick cykeln testas manuellt. Detta innebar dock att cykelns förmåga att självstyra med hjälp av ett styr- och reglersystem inte kunde testas. Skulle ett sådant system fullbordas rekommenderas det att följande körtest utförs för att testa cykelns kapabilitet att självstyra:

Körtest A består av att cykeln på en plan yta kör en rak sträcka på 50 meter, se figur 6.1. Körtest A:s syfte är att testa om cykeln kan bibehålla sin balans när den kör en rak sträcka på en plan yta, som visat i figur 6.1. Cykeln uppvisade god potential att klara av detta test då den självständigt efter en given ursprungshastighet klarade av en genomsnittssträcka på 59,7 meter med framgaffeln i kolfiber innan den ramlade, se tabell 5.7. Detta test är till för att säkerställa att cykeln klarar av att självbalansera även med hjälp av styr- och reglersystemet.



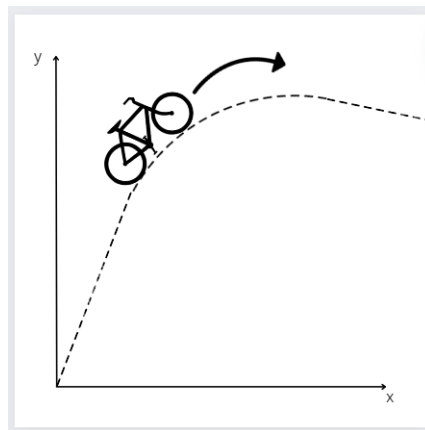
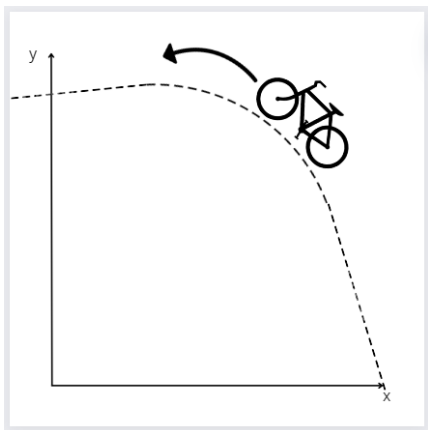
Figur 6.1: Körtest A: Rak sträcka

Körtest B består av att cykeln på en plan yta kör en rak sträcka på 10 meter där sedan en 90° vänstersväng implementeras med en radie på 15 meter. Efter vänstersvängen kommer cykeln köra ytterligare en rak sträcka på 10 meter. Körtest B illustreras i figur 6.2.

Körtest C utgörs av att cykeln på en plan yta kör en rak sträcka på 10 meter där sedan en 90° högersväng implementeras med en radie på 15 meter. Efter högersvängen kommer cykeln köra ytterligare en rak sträcka på 10 meter. Körtest

C illustreras i figur 6.3.

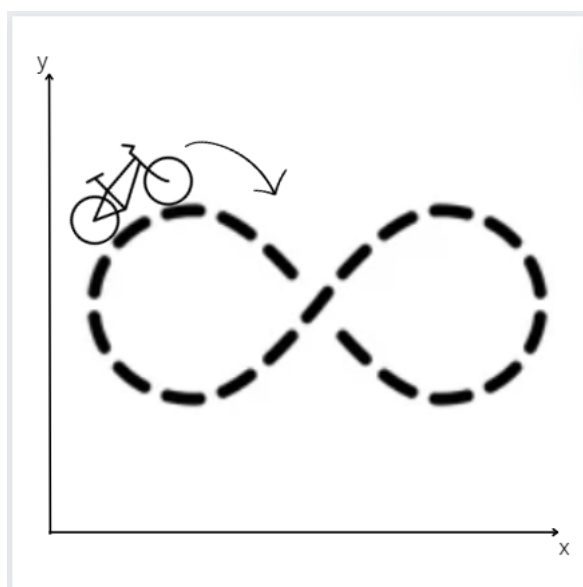
Körtest B och C:s syfte avser att undersöka ifall cykeln efter en inducerad sväng kan bibehålla sin balans med hjälp av styr- och reglersystemet, dels under svängen men även under raksträckan efter svängen.



Figur 6.2: Körtest B: Vänster sväng

Figur 6.3: Körtest C: Höger sväng

Körtest D består av att cykeln på en plan yta kör en rak sträcka på 10 meter för att sedan påbörja en 270° vänstersväng med en svängradie på 5 meter. Efter denna sväng kör den en rak sträcka på 10 meter för att sedan göra en 270° högersväng. Körtest D:s syfte är att testa om cykeln kan utföra längre svängar åt både höger och vänster och även hur väl den stabiliserar sig efter dessa. Detta görs genom att köra i en så kallad figure-eight bana som beskrivet ovanför och illustrerat i figur 6.4.



Figur 6.4: Körtest D: Figure-eight bana

6.4 Slutsats

Den slutgiltiga konstruktionen är en lätt och kraschvänlig cykel, i enlighet med projektets huvudmål. Det går att konstatera att cykeln är en klar förbättring jämfört med föregående projekts cykel och uppfyller tre av fyra projektmål. Projektmål 1 är inte avklarat på grund av att möjligheten för test med styr- och reglersystem för självbalansering och självkörning inte var möjligt. Men även projektmål 1 anses delvis avklarat då cykeln uppvisar en klar tendens att kunna självköras med pålagd hastighet, den är lättare än den föregående cykeln, det är lätt att byta de olika komponenterna vid behov och dess beståndsdelar är lättillgängliga och lättillverkade.

Den framtagna cykeln har eliminerat problemen med deformation i framgaffel då den inte påvisar någon deformation vid pålagd last. Den uppvisar inte heller någon skillnad mellan hjulvinkel och styrvinkel vilket, som nämnt i kapitel 6.2, kommer möjliggöra framtida tester utan att vinkelfel behöver tas till hänsyn. Cykeln kan även anta två olika huvudvinklar, vilket förut inte var möjligt.

Det valdes att använda framgaffeln i kolfiber istället för den i PETG-plast till den slutgiltiga cykeln. Detta då den vägde mindre, inte gav upphov till någon deformation vid deformationstesterna och var enklare att montera.

Då tillfälle att testa cykeln med styr- och reglersystemet aldrig uppkom och med resultatet från körtestet, visat i tabell 5.7 i beaktning så valdes en huvudvinkel på 73° . Den slutgiltiga cykeln presenteras i figur 6.5.



Figur 6.5: Slutgiltig cykel med framgaffel i kolfiber och huvudvinkel, $\lambda = 73^\circ$

Litteraturförteckning

- [1] Alzein, A., Kanjo, M., Klapp, W., Ornung, J., Rutgersson, J., Samuelsson, V. (2023). Design of a light, crash-worthy, self-driving bike (Bachelor's thesis). Hämtad från https://odr.chalmers.se/items/0d2bb472-72bb-4d4c-90df-bb709175ad2f?fbclid=IwAR3KlhgWa1K7JcVXBMD7BcZqw0rc3uxaw7s_tLSPhtaeWfEoVzWiPKtNOFk
- [2] Ansys. Granta EduPack [Computer software]. Hämtad från <https://www.ansys.com/products/materials/granta-edupack#tab1-2>
- [3] Aström, K. J., Klein, R. E., och Lennartson, A. (2005). Bicycle dynamics and control: Adapted bicycles for education and research. Hämtad från https://ieeexplore.ieee.org/document/1499389?fbclid=IwAR3HmN_OYLj-8E_LUX3WNGFn-OGJJZmzDFfUQNBAzC6STdsgPJ-f7D8uT8A
- [4] Dassault Systèmes. CATIA V5 [Computer software]. Hämtad från <https://www.3ds.com/products-services/catia/>
- [5] MathWorks. (2022). MATLAB R2022b [Computer software]. Hämtad från <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [6] Neuber, H (2023). Theory of Stress Concentration for Shear-Strained Prismatical Bodies With Arbitrary Nonlinear Stress-Strain Law. Hämtad från https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-11744265448&origin=resultslist&sort=cp-f&src=s&sid=46fa1fdca5eee0f41d605fe65bcbaa31&sot=b&sdt=b&s=TITLE-ABS-KEY%28%22stress+concentration+factor%22%29&sl=55&sessionSearchId=46fa1fdca5eee0f41d605fe65bcbaa31&relpos=0&retries=1&fbclid=IwAR1cWQVF44nMgU3AkDa-dNE3xsawY4kKcWfyQr6vQd7PsHzqBf_QAvYIn9I
- [7] Prusa. (Uppdaterad 2024). Warping. Hämtad från https://help.prusa3d.com/article/warping_2011?fbclid=IwAR2geQgd6gVQcRTG1rgszNdWQN3E8kr-Z240oodnJwju-swC7BDKNGbnlwA
- [8] Sundström, B. (2020). Handbok och formelsamling i Hållfasthetslära (Fjärde utgåvan).

A

Appendix 1

A.1 Inköpta och återanvända delar

A.1.1 Kolfibergaffel

Inköpta kolfibergaffeln Aerlite Elite Racor kolfiber gaffel se figur A.1. Inköpt från Bikeshop.se Spcifikationerna på gaffeln syns nedan.

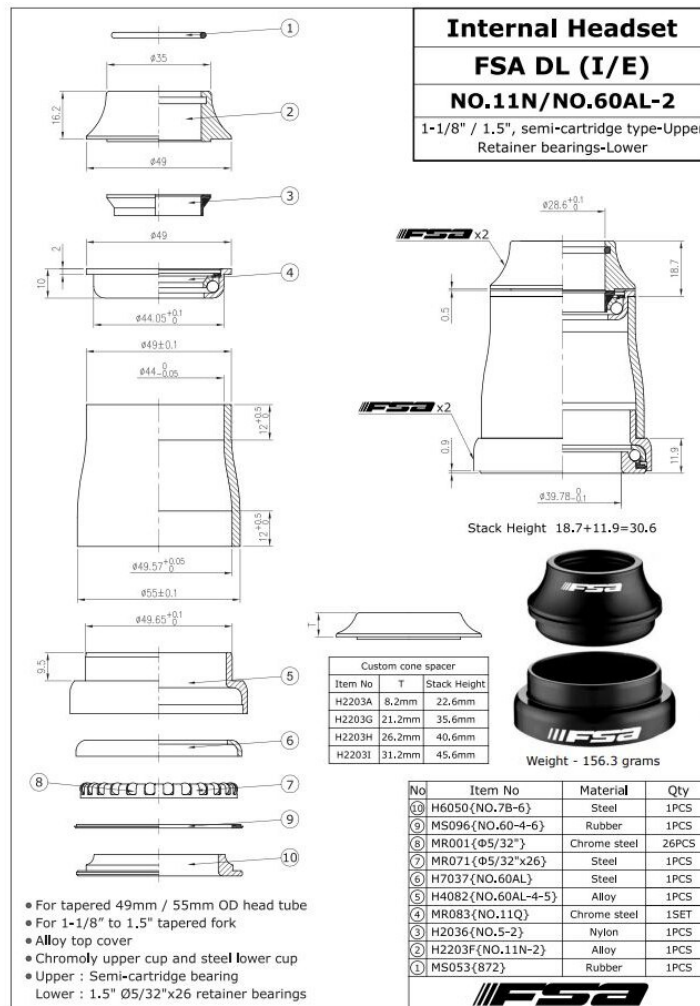
- Styrlager: Avsmalnande 1-1/8' - 1.5'
- Hjulstorlek: 28"/700C landsväg
- Vikt: 380g



Figur A.1: Inköpta kolfibergaffeln

A.1.2 Styrlager

Styrlager är inköpt från Bikeshop.se ritning syns i figur A.2.



Figur A.2: Ritning styrlager

A.1.3 Remhjul

Remhjulet som använts är från föregående konstruktion



Figur A.3: Remhjul taget från föregående konstruktion

A.1.4 Avloppsrör

Avloppsrör inköpta från Biltema med ytterdiameter 50 mm och innerdiameter 46mm se figur A.4. Kostar 50kr/m.



Figur A.4: Inköpta avloppsrör från Biltema

A.1.5 Slangklämmor

Slangklämmorna är inköpta från Biltema i tre olika storlekar med diametrar på 22-29 mm, 44-60 mm samt 70-90 mm . De två större varianterna kostar 33kr/st och den mindre 27 kr/st. Slangklämmornas visas i figur A.5



Figur A.5: Slangklämmor från biltema

INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2024
www.chalmers.se



CHALMERS