



Dokumentation Metall 3D-Druck: Auch für Designschaffende geeignet?
Eine Anwendung im Fahrradbau

Einleitung

Ausgangspunkt für die Arbeit war das persönliche Interesse an zeitgenössischen 3D-gedruckten Fahrradkomponenten aus Metall. Als Fahrradrahmenbauer* hatten mich existierende Anwendungen beeindruckt und die Motivation verstärkt, mehr über die Technologie des Metall 3D-Drucks - respektive *Additive Fertigung* zu erfahren.

Für diese Diplomarbeit wurde Kontakt mit Martin Schütz, Dozent am Departement für Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ), aufgenommen. Er ist Leiter des interdisziplinären Moduls *Design und Engineering - Interdisziplinäre Produktentwicklung (IPE)*, welches in Kooperation zwischen der ETHZ und Zürcher Hochschule der Gestaltung (ZHdK) durchgeführt wird.

Aufgrund meines mangelnden Vorwissens über Metall 3D-Druck, wurde ein Gespräch mit Fachleuten für *Additive Fertigung* des Zentrums für Produkt- und Prozessentwicklung der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) organisiert. Die Voraussetzung für eine potenzielle Zusammenarbeit war das methodische Vorgehen nach VDI 2221, einer Norm für Produktentwicklung des Vereins Deutscher Ingenieure. Das Erarbeiten einer Produktentwicklungsstudie und Auseinandersetzung mit Methoden im Allgemeinen, schaffte die Grundlage für die schriftliche Diplomarbeit *„Methodik in der Produktentwicklung - Gegenüberstellung zweier Ansätze“*.

Im Verlaufe der praktischen Bachelorarbeit hat sich gezeigt, dass eine Zusammenarbeit seitens der ZHAW nicht von genügend Interesse ist. Die Begründung dafür war der mangelnde „Added Value“ - dem Mehrwert des Projekts.

Enttäuscht durch die harte Realität der industriellen Sichtweise, besann ich mich meines handwerklichen Hintergrundes. Auf Basis der Fallstudie wurde eine individuelle Fahrradgabel konzipiert und gestaltet. Zeitweise schien das Projekt ganz von 3D-Druck zu lösen - mit der Zeit fand die Arbeit wieder zurück. Mit der Anwendung von computergestütztem Design, Simulation und Prototyping rückte das Projekt wieder näher ans Engineering.

Das Wechselspiel zwischen Handwerk und Technik hat diese Arbeit massgeblich beeinflusst. Die Prozesse dazu werden in der vorliegenden Dokumentation festgehalten.

1.1 Produktwahl

In der Tätigkeit als Fahrradrahmenbauer ist mein Ziel, die Wünsche der Kund*innen möglichst genau umzusetzen.

Dabei kann im high-end Bereich die Wahl der idealen Fahrradgabel eine Herausforderung sein. Die konventionell, handwerklich gefertigte Gabel (siehe Abb. rechts) bietet volle gestalterische Freiheit, hat jedoch zwei entscheidende Nachteile: der beachtliche Arbeitsaufwand und das vergleichsweise hohe Gewicht.

Bei speziellen Kund*Innenwünschen - wie Lichtkabelführung, Gepäckträger-, Schutzblech- und Scheinwerferhalterungen - gestaltet sich die Suche nach einem geeigneten Produkt oftmals schwierig, weil die Auswahl an Features und Kompatibilität begrenzt ist.

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Entwicklung einer Fahrradgabel für den Einsatz an leichten Tourenrädern, Alltagsvelos, Gravel-, Adventure- und Cyclocross Bikes.



Hayakawa Cycles: HK6 Light Touring Bicycle

1.2 Marktanalyse & Patente

Die Betrachtung der Produkte auf dem Markt hat ergeben, dass in den letzten Jahren die Auswahl an Fahrradgabeln gewachsen ist. Einen Überblick zu verschaffen ist aufgrund der Vielfältigkeit der Ausstattungen herausfordernd:

Neu sind Licht- und Akkuladekabelführungen, Schutzblechösen und sog. „Three Pack Mounts“ mit drei Gewindeösen an den Seiten (Abb. 1 & 2) anzutreffen. Ferner wurde vereinzelt die Möglichkeit geschaffen, die Länge der Gabel und des Gabelversatzes (Rake) durch ein drehbares Teil an der Achsaufnahme zu variieren (Abb.6).

Vorwiegend wird der Achsstandard 12mm Steckachse (TA; „Through-Axle“, Abb. 2, 5 & 6) verwendet. Der einstig am weitesten verbreitete Standard 9mm Schnellspanner (auch: QR; „Quick-Release“, s. Abb. 3 & 4) wird nur noch vereinzelt angeboten.

Gabelschäfte bilden die Schnittstelle zum Fahrradrahmen. Solche mit dem einstigen Standard 1 1/8 Zoll Durchmesser sind kaum mehr anzutreffen. Im Gravel oder Adventure Bereich überwiegen heute die Maße 1 1/4“ und 1.5“ tapered (Dt.: konifiziert, Abb. 7).



Abb. 1: CINQ Touring Fork,
1 1/8" Schaft, 15mm TA, PM 160mm



Abb. 2: Genesis CGR1 Carbon Fork
1 1/8", 12mm TA, Flatmount

U.S. Patent Sep. 22, 2020 Sheet 1 of 6 US 10,780,736 B2

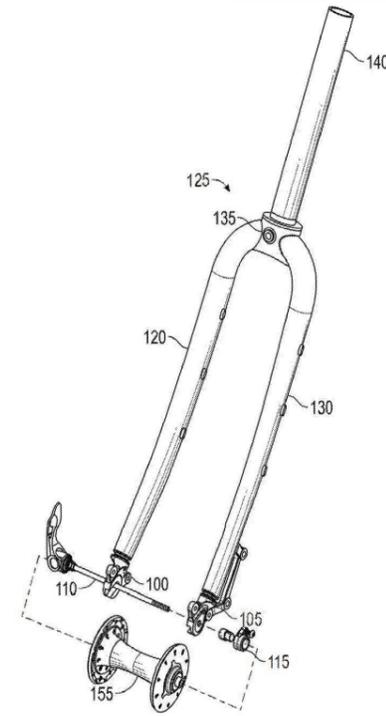


FIG. 1A

Abb. 3: Patentskizze - Trek Bicycles
mit Schnellspannachse (110), 1 1/8" Gabelschaft (140)

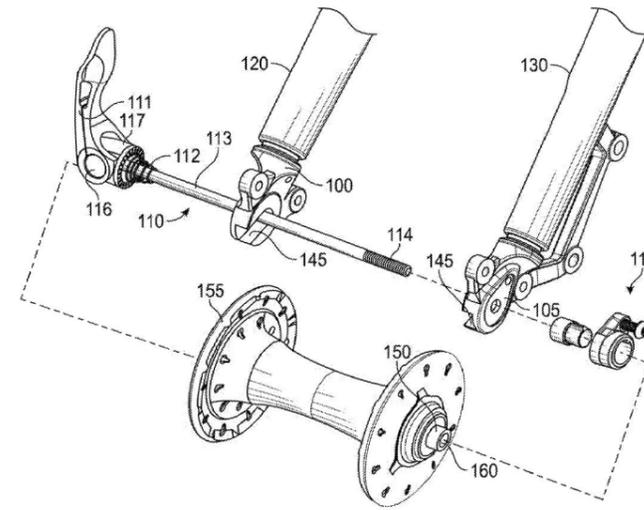


FIG. 1B

Abb. 4: Patentskizze - Trek Bicycles, Details Achse



Abb. 5: Ritchey Adventure Gravel Fork, 12mm TA,
Flatmount



Abb. 6: ENVE Adventure Fork - Flip Chip Detail



Abb. 7: Enve Adventure Fork - Crown Detail
Ausgang Lichtkabelführung, Ösen für Licht und Schutzblech

1.2 Marktanalyse & Patente

Zusätzlich zu den Carbonsabeln sind Modelle aus Stahl, Aluminium und seltener aus Titan anzutreffen. Diese sind im Verhältnis schwerer als vergleichbare Modelle aus kohlefaserverstärktem Kunststoff.

Bei sportlich orientierten Nutzenden fällt aufgrund des Gewichts die Wahl vorzugsweise auf Gabeln aus Carbon. Diese haben jedoch den Nachteil, dass das Material nicht recyclingfähig ist und das Maximalgewicht für Fahrer*innen beschränkt ist, oder befestigtes Gepäck ein Gewicht von ca. 8-10kg nicht übersteigen darf. Hier bieten Gabeln aus Stahl, Aluminium oder Titan mit höherer Ladekapazität bis zu 20kg einen Vorteil.

Die Gabeln aus Metall haben die Rohrkonstruktion gemeinsam, wobei sie in verschiedene Varianten oder Stile unterschieden werden: Unicrown (Abb. 1, 2, 4), Segmentiert (Abb.3 & 5) und gemufft (Abb. 6). Die Formensprache unter den einzelnen Modellen unterscheidet sich aufgrund der Konstruktionsweise nur gering.

Aufgrund der vielzähligen Features gestaltet sich die Wahl einer geeigneten Fahrradgabel selbst für Fachleute als schwierig.



Abb. 1: Velotraum Aluminiumgabeln
Aluminium, Unicrown



Abb. 3: Bearclaw Ti Gravel Fork 100
Titan, segmentiert



Abb. 5: Brother Cycles Steel Gravel Fork
Stahl, segmentiert



Abb. 2: FARR Cromo Fork
Stahl, Unicrown



Abb. 4: Landyachtz Adventure Fork
Stahl, Unicrown

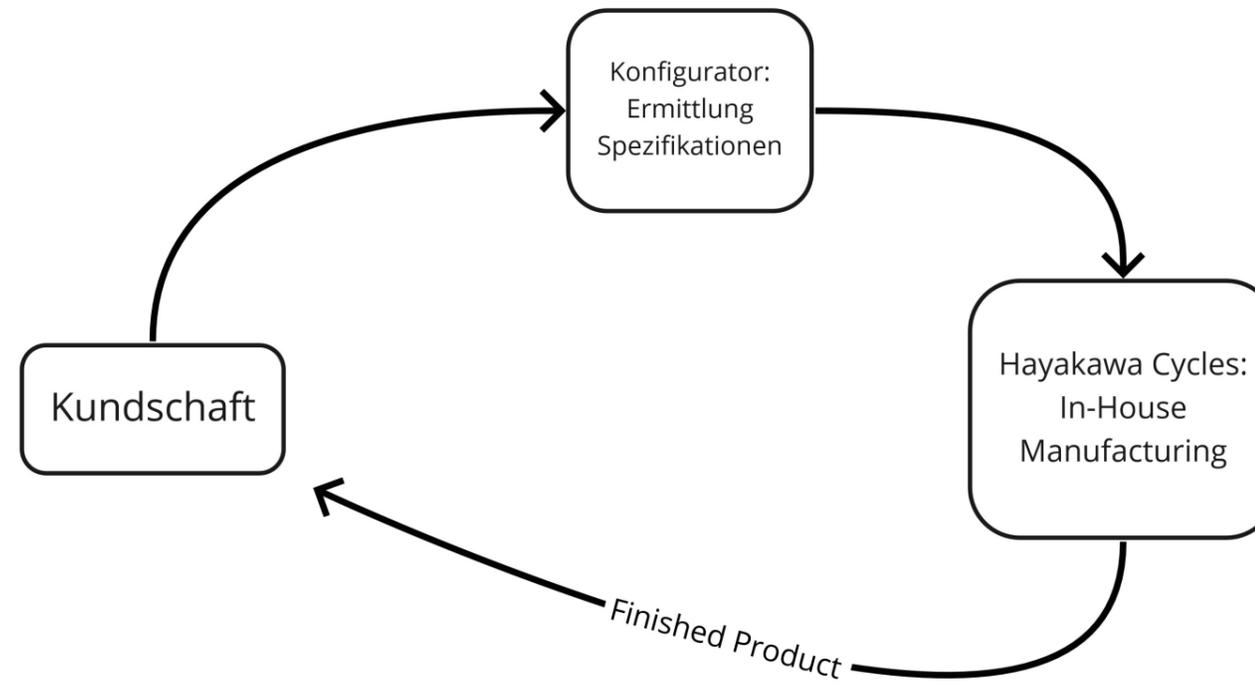


Abb. 6: Surly Disc Trucker Fork
Stahl, gemufft

2 Szenario

Das Rahmenbaugeschäft als direkte Anlaufstelle ermöglicht den Endnutzenden unmittelbar mit der Produktion in Kontakt zu treten.

Das Bedürfnis nach einer einfachen Auswahlmöglichkeit der Ausstattung zwischen verschiedenen Standarts hat sich bestätigt. Vielseitige Verwendbarkeit wird gewünscht, dabei soll die Konfiguration der Features individuell gewählt werden können.



Ermittlung der Spezifikationen mittels Konfigurator oder im Austausch zwischen Kundschaft und Fahrradrahmenbauer

2.1 Persona

Jakob ist Ingenieur und passionierter Radfahrer. Für den Alltag benötigt er ein zuverlässiges, robustes, versatiles Fahrrad. Dasselbe möchte er für Ausfahrten am Wochenende und Radreisen während den Ferien gebrauchen. Mal mit - mal ohne Gepäck.

Er weiss, dass sich ein Fahrrad ohne unnötiges Gewicht besser fährt und setzt deshalb auf eine leichte, dennoch robuste Ausstattung.

Was seine Ausrüstung betrifft, hat Jakob ganz spezifische Vorstellungen und freut sich an der Mitgestaltung seines individuellen Fahrrads. Für die passende Konfiguration kommen für ihn Produkte aus dem Hochpreissegment in Frage. Aufgrund seiner hohen Körpergrösse hat er Mühe, passende Fahrräder zu finden. Deshalb ist für ihn umso bedeutungsvoller, dass sein Traumrad zu seinen Körpermassen und Bedürfnissen passt.



2.2 Anforderungen

Als Grundlage für die Gestaltung einer Fahrradgabel wurden im Austausch mit Nutzenden und Fachleuten die Anforderungen eruiert und quantitativ resp. qualitativ bewertet.

Die Ergebnisse wurden entsprechend dem Leitfaden für Produktentwicklung IPE in einer Anforderungsliste tabellarische dargestellt und geordnet (s. Anhang).



2.3 Konfigurationsmatrix

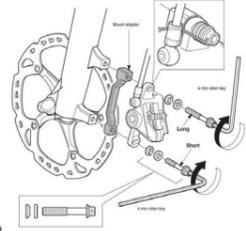
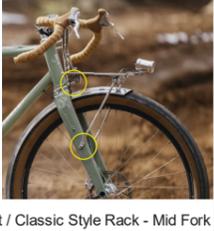
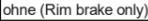
Als Antwort auf die Herausforderung der Wahl einer geeigneten Fahrradgabel aufgrund der Vielfalt der Standarts und Features, wurde eine Konfigurationsmatrix (s. Anhang) erstellt. Sie zeigt die verschiedenen Features und Optionen auf und bietet einen gesamtheitlichen Überblick.

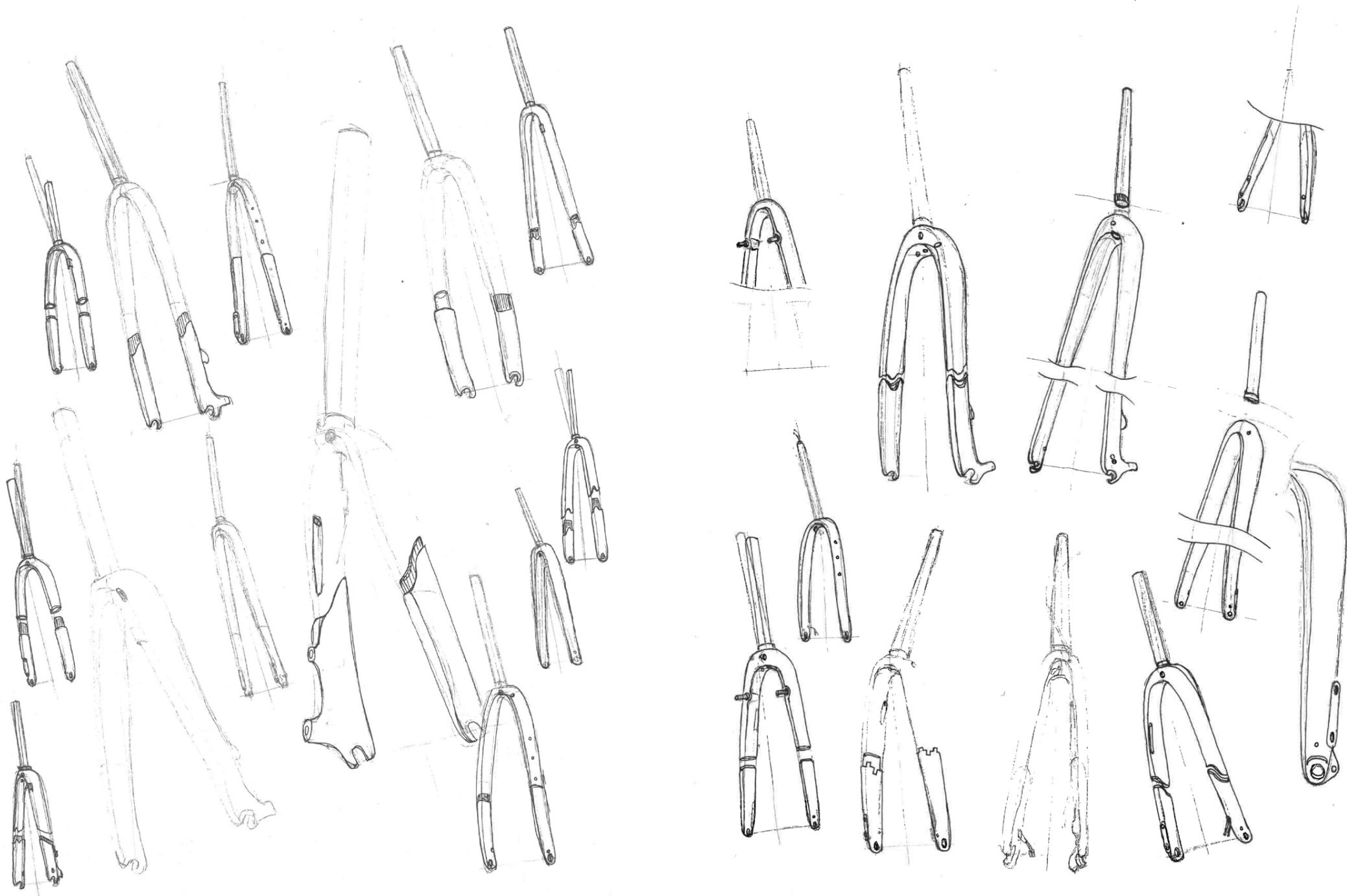
Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Konfigurator als Konzept vor und kann als Basis für eine spätere Umsetzung dienen.

Die Auswahl wird soweit vereinfacht, dass Laien in der Lage sind, den Konfigurator selbständig zu verwenden. Die Bilder (siehe Abb.) unterstützen das Verständnis.

Mittels eines Konfigurators kann auf einfache Art eine individuelle Ausstattung ermittelt und visualisiert werden.

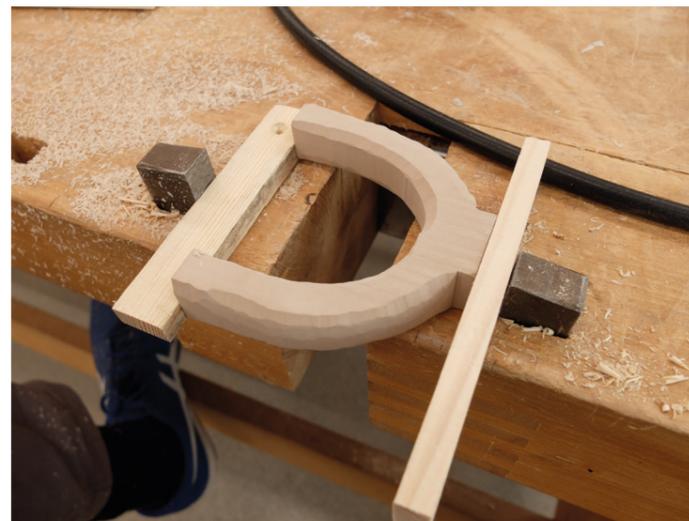
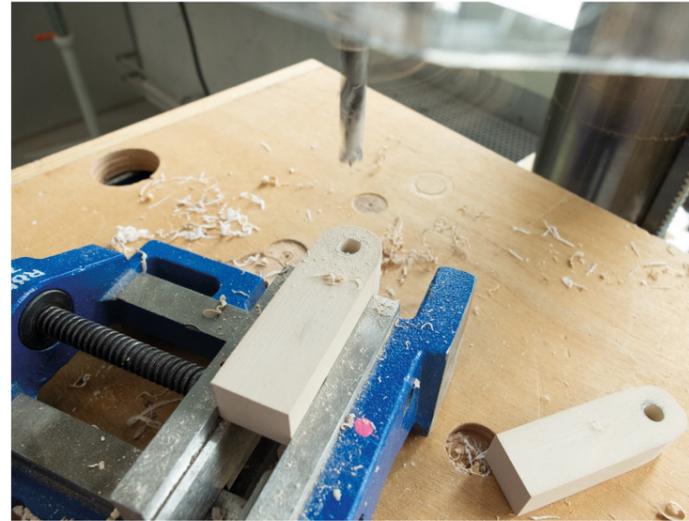
Ein solcher Konfigurator vermittelt eine Vorstellung des individuellen Produkts, ohne dass vertiefte Kenntnisse in der Fahrradtechnik notwendig sind.

Gesamtlösungen - Konfiguration							
Projekt: Bachelorarbeit							
Produkt: Versatile Fahrradgabel							
Name: Yuri Maurer / HSLU BA Objektdesign							
Stand: 23/03/2021							
Kombinatorik: morphologischer Kasten							
Funktion	Lösungen						
Nr.	Benennung der Funktion	1	2	3	4	5	6
01	Bremsmontage	 Postmount	 Flatmount	 Cantilever / V-Brake			
02	Gepäck	 Three-Bolt / Anything Cage	 Lowrider	 Porteur / Basket / Classic Style Rack - Dropout & Fork Crown Eyelet	 Porteur / Basket / Classic Style Rack - Mid Fork & Fork Crown Eyelet	 Angled & Offset Double-Three-Pack / Sonderwünsche	ohne
03	Reifenfreiheit	 700x60C / 650Bx2.4"					
04	Führung Bremsleitung	 Innen, geführt	 Aussen, Clip-on Holmen vorne	 ohne (Rim brake only)			



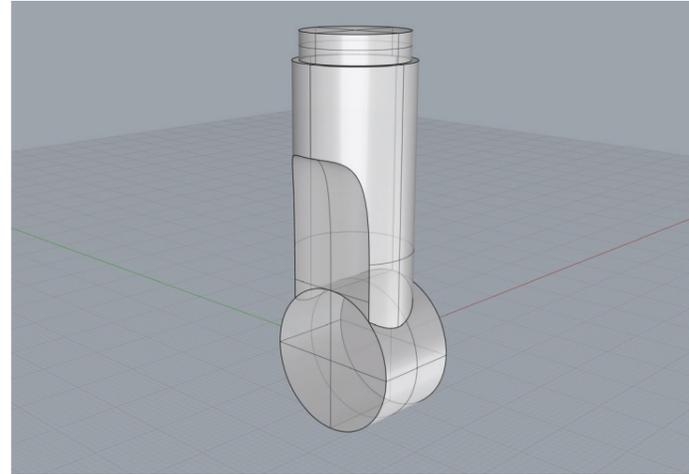
3.2 Modellbau

Anhand der Skizzen wurden erste Urmodelle in Anwendung handwerklicher Techniken hergestellt. Die Vorteile des Modellbaus im Vergleich zur computergestütztem Design ist die schnelle Umsetzbarkeit von Skizzen in sinnlich erfahrbaren Probestücke.



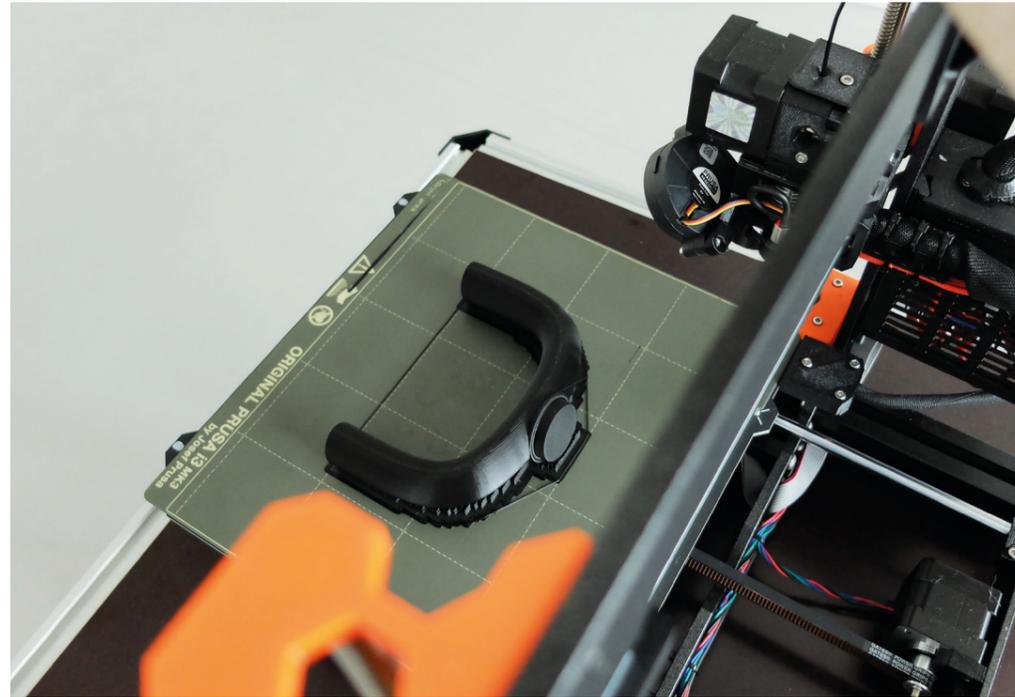
3.3 Formstudie

Um die Formensprache der Modelle zu variieren, wurden Modelle in Kombination von computergestütztem Design (CAD), 3D-Druck (Kunststoff 3D-Druck) und Modellieren gefertigt.



3.4 Rapid Prototyping

Anhand der Erkenntnisse aus den Modellen wurde eine Anpassungen im CAD gemacht und sukzessive in 3D-gedruckten Prototypen aus Kunststoff umgesetzt.



4 Verifikation Finite Element Analyse

Um eine Einschätzung zu erhalten, ob das gestaltete Teil den zu erwartenden mechanischen Belastungen standhält, wurde versuchsweise anhand eines Tutorials eine Statikanalyse durchgeführt.

Dazu wurden in einer Simulationssoftware schrittweise Druckkräfte von bis zu 20'000N nachgebildet, welche von oben her auf das einzelne Bauteil einwirken.

Im Gespräch mit Martin Schütz wurde klar, dass im Engineering zusätzliche Parameter berücksichtigt werden, um verlässliche Daten zu erhalten (siehe Abb. 4). Dabei würde die Gabel als Ganzes konstruiert und geprüft.

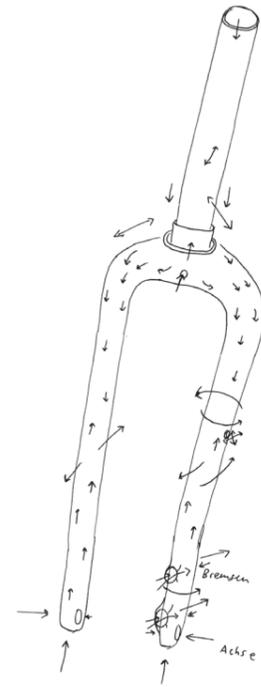


Abb. 1: Annahmen Kräfteeinwirkungen

Die Simulation wurde aus Perspektive eines Produktdesigners ohne Kenntnisse des Maschinenbaus durchgeführt. Aufgrund der geringen technischen Tiefe liefern die erhaltenen Daten keine verlässlichen Erkenntnisse. Sie dienen in erster Linie als Referenz. Die neue Erfahrung hat einen wertvollen Einblick ins Engineering geboten.

Eine weiterführende Analyse könnte die Gewichtsoptimierung näher an die physikalische Limite bringen. Die Vorteile wären nebst Gewichtseinsparung (Performance) die Senkung der Produktionskosten aufgrund des reduzierten Materialaufwandes.

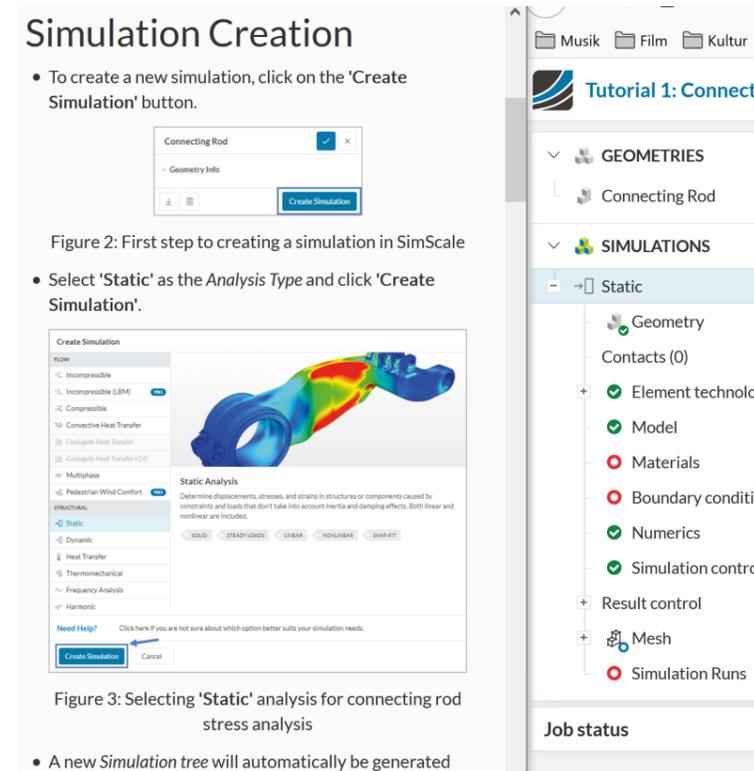


Abb. 2: Tutorial SimScale

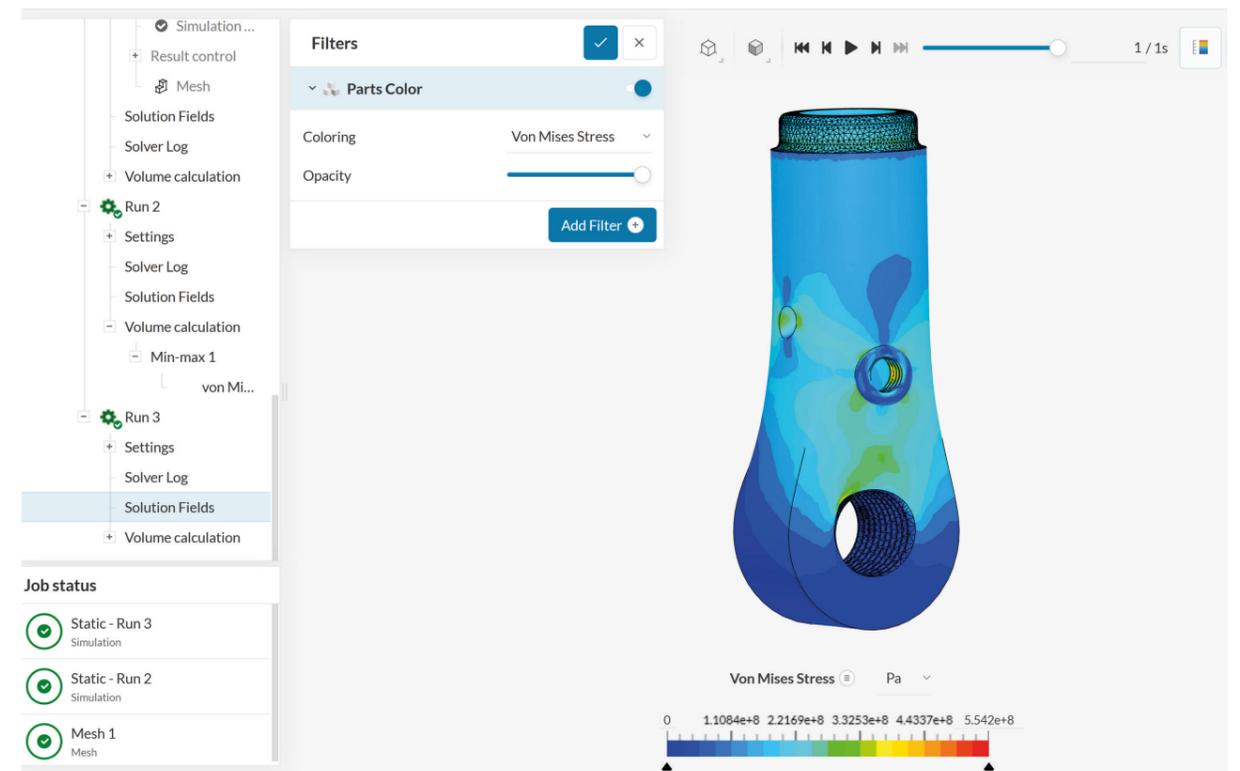


Abb. 3: FEA Finite Element Analysis (SimScale)

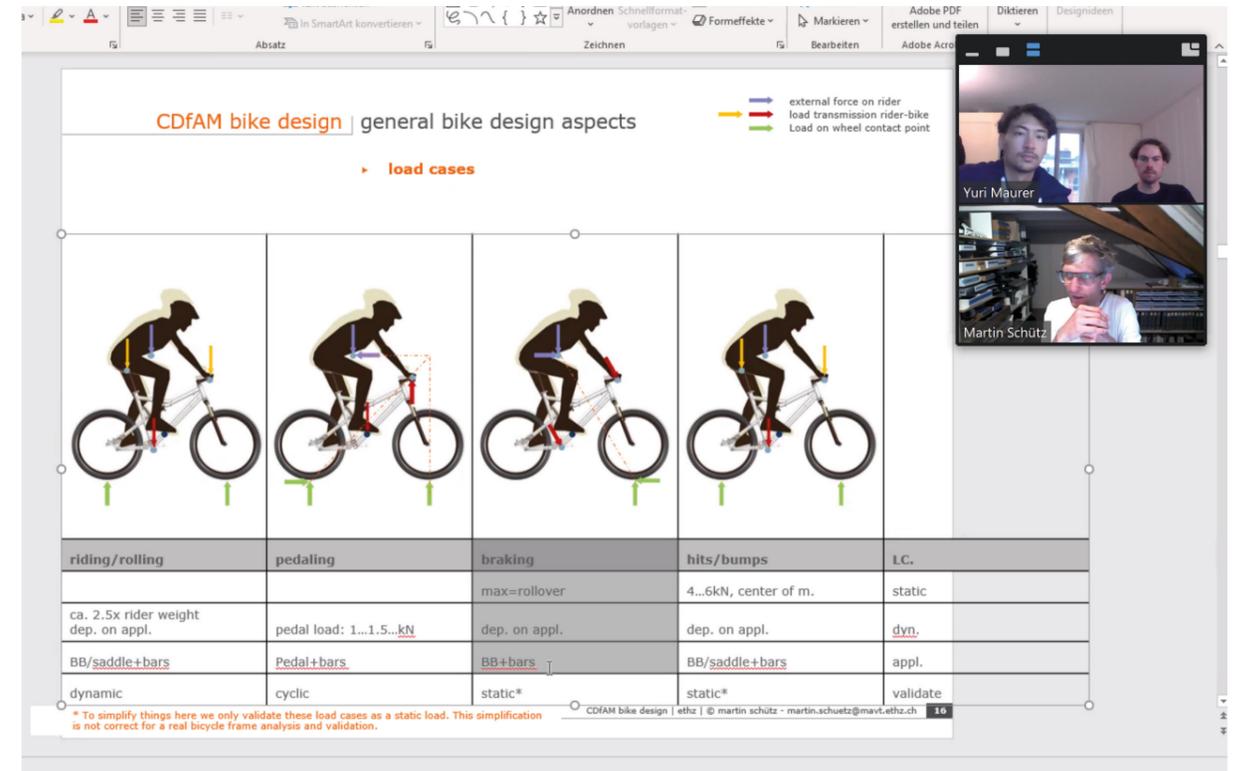


Abb. 4: Beispiele Mechanische Belastungen am Mountainbike
Nachbesprechung mit Mentor Martin Schütz (ETHZ/ZHdK)

5 Renderings

Anhand der CAD-Daten generierte Visualisierungen der erarbeiteten Modelle.



6 Prototypen SLM

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Prototypen des rechten Ausfallendes in rostfreiem Stahl gedruckt. Die Teile wurden im *SLM-Verfahren (Selective Laser Melting)* am Departement für Technik und Architektur der Hochschule Luzern in Horw gefertigt.

Durch den Erhalt der Teile konnte ein Bild des gesamten Prozesses erarbeitet werden, welches den 3D-Druck mit Metall umfasst. Die materialisierten Modelle liefern neue Erkenntnisse über die Machbarkeit und potenzielle Optimierungen.



Abb. 1: Mlab Concept Laser



Abb. 2: Prototyp mit Bauplattform



Abb. 3: Vergleich Prototypen; aus Kunststoff (PLA), rostfreiem Stahl unbearbeitet und geschliffen/sandgestrahlt (v.l.n.r.)

Schluss

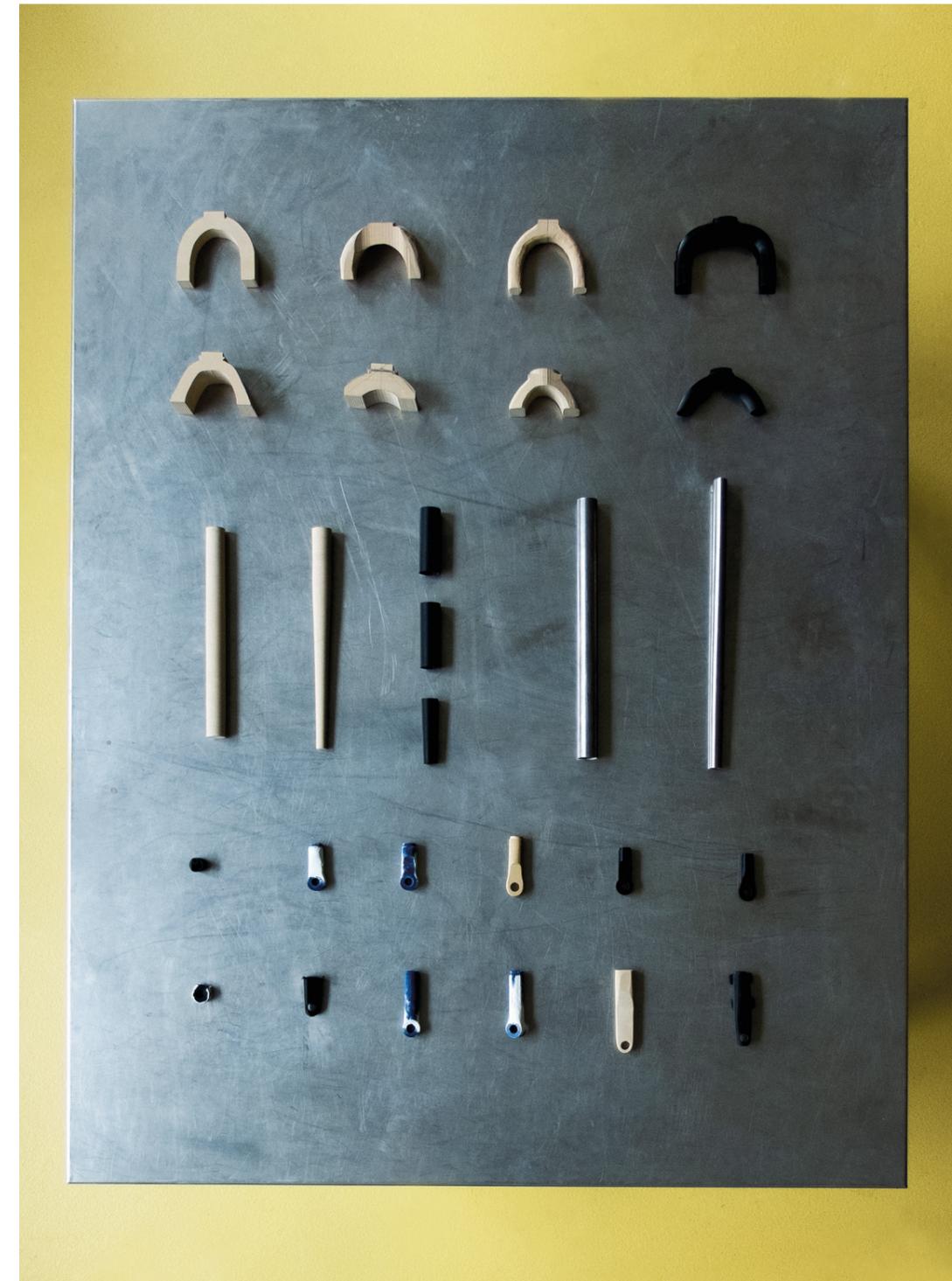
Die Auseinandersetzung mit Additiver Fertigung im Rahmen der Diplomarbeit startete ich ohne genaue Vorstellung über die Inhalte dieser Technologie. Während des gesamten Prozesses wurden immer wieder neue Möglichkeiten und Grenzen ausgelotet.

Nach einer zu Beginn eher technischen Auseinandersetzung, fand eine Rückbesinnung auf die eigene handwerkliche und gestalterische Tätigkeit statt. Bis zum Abschluss des Projekts hat sich diese mit den neuen Erfahrungen im methodischen Vorgehen, Skizzieren, Modellbau, computergestütztes Design, Rapid Prototyping, Simulation etc. um ein vielfaches weiterentwickelt.

Die Konzeption und Formgebung von Metall 3D-gedruckten Bauteilen sind für Designschaffende durchaus machbar - die fertigungsgerechte Konstruktion im CAD, Simulation und Optimierung stellen jedoch die Grenzen zum Engineering dar. Meiner Meinung nach ist für Designschaffende nur schwer möglich, das vollständige Potenzial von 3D-Druck auszuschöpfen. Für eine weiterführung dieses Projekts, wäre eine enge Zusammenarbeit mit Spezialist*innen aus Konstruktion und Engineering zielführend. Diese Produktentwicklung ist somit keineswegs an ihrem Ende angelangt. Um zu einem funktionstüchtigen Prototypen umgesetzt und Markttauglich zu werden, bedarf sie weiteren Iterationen im Entwicklungsprozess.

Herzlichen Dank an Martin Schütz (ETHZ/ZHdK), Michael Hofmann (HSLU Technik & Architektur) und Thai Hua (HSLU Design & Kunst) für die wertvolle Unterstützung.

Bern, im Juni 2021



Anforderungsliste

Projekt **Bachelor Thesis**
 Produkt **Versatile Fahrradgabel**
 Team Yuri Maurer / BA HSLU Objektdesign
 Stand 15/06/2021

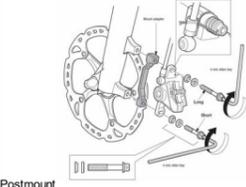
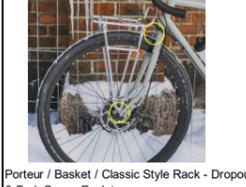
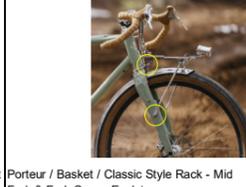
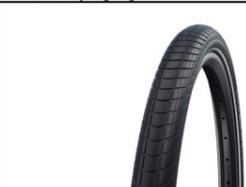
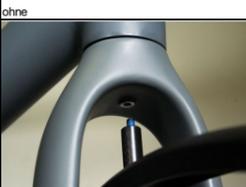
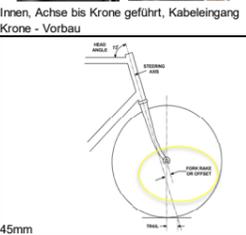
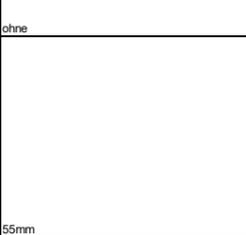
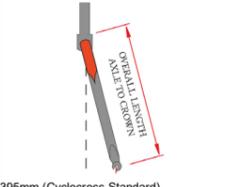
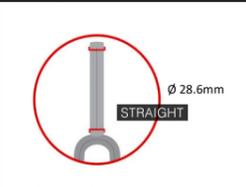
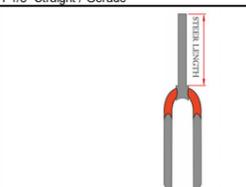
allgemeine Anforderungsliste

Anforderung			zu erfüllende Eigenschaften				
Nr.	Benennung	Bemerkungen	Art	qualitativ Eigenschaft	quantitativ Zahlenwert	Toleranz	Einheit
	eindeutige Benennung der Anforderung	ergänzende Bemerkungen	Festforderung Bereichsforderung Wunschforderung			+/-	
001	Stabilität	Zertifikation	1		100%		0 %
002	Gewicht	minimal	1		800g		100 g
003	Steffigkeit	unendlich	1		80%		
004	Flex / Dämpfung		1		20%		
005	Lenkverhalten	Einsatz mit oder ohne Ladung an Gabel, siehe 006	1	Balance Wendigkeit/ Laufruhe	50 / 50		
006	Rake	unterschiedliche Werte je nach Fahrradgrösse / Gewichtsverteilung	1		55mm		
007	Trail	[Abhängigkeit Steuerrohrwinkel / Fussfreiheit >80mm]	1		60mm		5 mm
008	Preis		1		1,500 €		
009	Distanz Achse-Krone	Geometrieveränderung (!)	1		395 bis 410 [mm]		0.5 mm
010	Reifenfreiheit	ohne Schutzblech	1		700x60C, 650x60B		
011	Freiraum Schutzblech	10mm	1	Freiraum	700x50C 650x50B		
012	Bremsscheiben		1	geometrische Anforderungen Freiraum	140, 160, 180, 203 [mm]		
013	Bremsen Caliper Montage	Flatmount, Postmount, Cantilever. möglichst ohne Adapter	1	geometrische Anforderungen, saubere Sitze			
014	Gepäck	3 Pack vo/hi, Ortlieb Clip-on, Pannier / Lowrider, Front Racks (+1 Std.?)	1		15kg		.5mm
015	Bremsleitung Führung	innen oder aussen (oben an Gabelscheide Vorderseite, ev. hinten für Hebelmontage rechts)	1	Integration, Reparierbarkeit, keine Knicke / Überschneidung			
016	Achse sicher in Gabel halten	Adapter für 15mm > 12mm existieren	1	9mm QR, TA12x100mm (x1.5mm) TA15x100mm [Gewinde], Road Boost 12x110mm			
017	Gabelschaft		1		1 1/8" = 28.575mm		0.05 mm
018	Lagersitz Steuerlager	Für Innendurchmesser Rahmen 33.95mm, 36.95mm, 49.61mm (CK Devolution)	1	Schöner Übergang zu Steuerlager / Steuerrohr	30.1mm Seat OD		0.05 mm
019	Scheinwerfer Befestigung		1	Sacklochgewinde Gabelkrone vorne	M6x1mm		
020	Kabelführung Licht / Sinewave Reaktor	Eingang Antriebsseite oberhalb Achse. Ausgang Krone nach vorne / Übergang zu Schaft	1	Platz für zwei Koaxialkabel, Innen geführt, wasserdicht	Ø 5mm ? Tbc		
021	Schutzblech Befestigung	An Gabelkrone / Oberhalb Achse	1	Sacklochgewinde Krone M6 hinten oder unten / M5 Oberhalb Achse	tbd		M6: nach DIN 13
022	Aerodynamik		1		Widerstand 0		
023	Spurtreue		1	Symmetrie	100		
024	Dichtheit oder Abfluss	Wasser in Gabel	1		100		

Gesamtlösungen - Konfiguration

Projekt Bachelorarbeit
 Produkt Versatile Fahrradgabel
 Name Yuri Maurer / HSLU BA Objektdesign
 Stand 15/06/2021

Kombinatorik: morphologischer Kasten

Funktion		Lösungen					
Nr.	Benennung der Funktion	1	2	3	4	5	6
01	Bremsmontage	 Postmount	 Flatmount	 Cantilever / V-Brake			
02	Gepäck	 Three-Bolt / Anything Cage	 Lowrider	 Porteur / Basket / Classic Style Rack - Dropout & Fork Crown Eyelet	 Porteur / Basket / Classic Style Rack - Mid Fork & Fork Crown Eyelet	 Angled & Offset Double-Three-Pack / Sonderwünsche	ohne
03	Reifenfreiheit	 700x60C / 650Bx2,4"					
04	Führung Bremsleitung	 Innen, geführt	 Aussen, Clip-on Holmen vorne	ohne (Rim brake only)			
05	Scheinwerferhalterung	 M6 Gabelkrone vorne	ohne				
06	Schutzblechhalterung	 M6 Gabelkrone hinten (+ Dropout Eyelet)	 M6 Gabelkrone unten (+ Dropout Eyelet)	ohne			
07	Aufnahme Achse	 QR 9x100mm	 TA12 Ø12 x 100mm	 TA15 Ø15 x 100mm			
08	Kabelführung Dynamo / Powerbank	 Innen, Achse bis Krone geführt, Kabeleingang Krone - Vorbau	ohne				
09	Rake (Gabelversatz) - Abhängig von Rahmengeometrie - Trail (Nachlauf) idealerweise +/- 60mm	 45mm	 55mm	custom XXmm			
10	Länge Achse - Krone	 395mm (Cyclocross Standard)	Custom XXXmm				
11	Durchmesser Gabelschaft	 1 1/8" Straight / Gerade	 1 1/8" > 1.25" Tapered / Konifiziert	 1 1/8" > 1.5" Tapered / Konifiziert			
12	Länge Gabelschaft	 uncut 310mm	Custom XXXmm				